



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

**XXXIII**

# CONGRESO NACIONAL DE RIEGOS

16, 17, 18 de junio de 2015  
Valencia





# XXXIII CONGRESO NACIONAL DE RIEGOS

Valencia, 16 – 18 de junio de 2015



## *Colección Congresos UPV*

Los contenidos de esta publicación han sido evaluados por el Comité Científico que en ella se relaciona y según el procedimiento que se recoge en [www.congresorriegos-aeryd.org](http://www.congresorriegos-aeryd.org)

### Editores

Álvaro Royuela Tomás  
Jaime Arviza Valverde

### Editado por

Editorial Universitat Politècnica de València, 2015  
[www.lalibreria.es](http://www.lalibreria.es) / Ref.: 2115\_03\_01\_01

ISBN: 978-84-9048-374-9

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/CNRriegos.2015.1530>



XXXIII Congreso Nacional de Riegos.

Se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-NoDerivada 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Basada en una obra en <http://ocs.editorial.upv.es/index.php/CNRriegos/CNRriegos33/>



# XXXIII CONGRESO NACIONAL DE RIEGOS

Valencia, 16 – 18 de junio de 2015

## ORGANIZAN

---

ASOCIACION ESPAÑOLA DE RIEGOS Y DRENAJES - AERYD

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA AGRONÓMICA Y DEL  
MEDIO NATURAL - UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

CONSEJERÍA PRESIDENCIA, AGRICULTURA, PESCA, ALIMENTACIÓN Y  
AGUA

DIPUTACIÓN DE VALENCIA

DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA, MAGRAMA

DIRECCIÓN GENERAL DE DESARROLLO RURAL Y POLÍTICA  
FORESTAL, MAGRAMA

SOCIEDAD ESTATAL DE INFRAESTRUCTURAS AGRARIAS (SEIASA)

GRUPO TRAGSA

CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL JÚCAR

INSTITUTO VALENCIANO DE INVESTIGACIONES AGRARIAS (IVIA)

TRIBUNAL DE LAS AGUAS DE LA VEGA DE VALENCIA

FEDERACION NACIONAL DE COMUNIDADES DE REGANTES (FENACORE)

CONSEJO GENERAL DE COLEGIOS OFICIALES DE INGENIEROS  
AGRÓNOMOS

COLEGIO OFICIAL DE INGENIEROS AGRÓNOMOS DE LEVANTE

COLEGIO OFICIAL DE INGENIEROS TÉCNICOS AGRÍCOLAS DE VALENCIA  
Y CASTELLÓN

FUNDACIÓN CAJAMAR



# COMITÉ ORGANIZADOR

---

## **PRESIDENTE**

Prof. D. Alberto San Bautista Primo Director de la Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Agronòmica i del Medi Natural-U.P.V.-CVER

## **SECRETARIOS**

Central: Dña. Pilar Ortiz y Ruiz a. Pi del Castillo - AERYD

Local: D. Álvaro Royuela Tomás - Prof.Titular de Hidráulica ETSIAyMN-U.P.V.-CVER

## **SECRETARIOS ADJUNTOS**

Central: D. José Antonio Ortiz Fdz.-Urrutia - AERYD-CERYD

Local: Prof. D. Jaime Arviza Valverde - Catedrático de Hidráulica ETSIAyMN-U.P.V.

## **VOCALES – (Entidades representadas)**

D. José María de Miguel Pérez, Presidente de AERYD

D. José Antonio Baso López, Subdirector de Análisis y Estudios-Grupo Tragsa

D. Luis Bonet Pérez de León, IVIA

D. Pedro Juan Borrás Gomar, Prte.C.R. Real Acequia Carcagente-FENACORE

José Alberto Comos Guillém, Dircor.Gral.Agua,Cnsja.Presidencia y Agricultura, Pesca, Alimentación y Agua, Generalidad de Valencia

D. José Manuel Delgado de Molina Cánovas, Clg.Ofcl. Ing.Agrónomos de Levante

D. Salvador Enguix Morant, Diputado Medio Ambiente, Diputació de València

D. Gabriel García Martínez, Subdirector de Cátedras de Empresa ETSIAMN-UPV.

D. Salvador García Todolí, Clg.Ofcl. Ing.Técnicos Agrícolas de Valencia y Castellón

D. Jesús Giménez Ejarque, Coordinador Obras y Proyectos Zona Este, Subdirc.Gral.Regadíos de la D.G.D.R. MAGRAMA



D. José Ramón López Pardo, Consejero Técnico Subdir Gral. Planific Uso Sostenible del Agua-Dirección Gral. del Agua MAGRAMA

Dña. Nieves Mondéjar Martín, Jefa Srv. Comisaría Aguas, C.H. del Júcarn

D. Javier Pastor Madalena, Letrado Asesor Acequias Rascaña y Mislata Tribunal de las Aguas de la Vega de Valencia

D. Pedro Ramón Serrano García, Delegado Grupo Tragsa Comunidad de Valencian

D. Miguel Valero Ganau, Jefe de la Oficina Operativa de SEIASA en Valencia

D. Carlos Baixauli Soria, Fundación Cajamar - Director del Centro de Experiencias

## **COMITÉ CIENTÍFICO**

---

D. Luis Bonet Pérez de León Instituto Valenciano Investigaciones Agronómicas - GVA

D. Javier J. Cancela Barrio Ingeniería Agroforestal - Campus de Lugo - Univ.Santiago Compostela

D. José M<sup>a</sup> González Ortega TRAGSATEC

D. Luis Juana Sirgado ETSI Agrónomos – Hidráulica – Uni. Politécnica Madrid

D. Sergio Lecina Brau, Dr. Ing. Agrónomo e Ing. de Montes - Investigador

D. Manuel López Hernández Grupo TRAGSA

D. Juan Manzano Juárez Ingeniería Rural - E.T.S.I.Agronómica y del Medio Natural - Univ.Ptc.Valencia-CVER

D. Victoriano Martínez Álvarez Ing. Alimentos y Eq. Agríc. E.T.S.I.Agronómica Univ. Ptc.Cartagena

D. Bernardo Pascual España Centro Valenciano de Estudios del Riego – Uni.Politecnica de Valencia

Dña. Nuria Pascual Seva Centro Valenciano de Estudios del Riego – Uni.Politecnica de Valencia

D. Francisco Ramírez de Cartagena Bisbe Ingeniería Hidráulica - Escuela de Ingeniería Agraria - Univ. Gerona

D. Juan Antonio Rodríguez Díaz Agronomía – E.T.S.I. Agrónomos y Montes - Univ. Córdoba

D. Ángel Ruiz Padín Ingeniería del Riego - E.S.y T.I. Agraria -Univ. de León

D. Manuel Valiente Gómez Producción Vegetal - E.T.S.I.Agrónomos - Univ. Castilla la Mancha, Albacete

## **ENTIDADES PATROCINADORAS (EXPOSITORAS)**

HIDROTEN, S.A.

AMIAANTIT SPAIN, S.A

RUBICON WATER, S.L.

HIDROCONTA, S.A.

DELAQUA ÚLTIMAS TECNOLOGÍAS, S.L.

PAVASAL EMPRESA CONSTRUCTORA, S.A.

IONIZADORES CALCÁREOS, S.L.

SISTEMA AZUD, S.A.

## **ENTIDADES COLABORADORAS**

SAINT-GOBAIN PAM ESPAÑA, S.A.

MOLECOR TECNOLOGÍA, S.L.

AIGÜES DEL SEGARRA GARRIGUES, S.A.

FEDERACIÓN NACIONAL DE COMUNIDADES DE REGANTES DE ESPAÑA-  
FENACORE

INSTITUTO NAVARRO DE TECNOLOGIAS E INFRAESTRUCTURAS  
AGROALIMENTARIAS, S.A.-INTIA

EINAR, S.A.

MATERIAL DE AIREACIÓN, S.A. (MASA)

ADEQUA (URALITA SISTEMA DE TUBERÍAS, S.A.)

# **TRABAJOS PRESENTADOS**

---



## **GRUPOS TEMAS “A”**

# **AGROHIDROLOGÍA. HIDROLOGÍA DEL RIEGO**

---

Relaciones agua-suelo-planta- atmósfera. Necesidades hídricas de los cultivos. Balance de agua. Coeficientes de cultivo. Estrategias de riego en áreas con escasez de agua. Respuesta de los cultivos a riegos deficitarios. Nuevos métodos y tecnologías de medición del agua de riego, herramientas de cálculo y modelos de simulación.



## METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN DE DOS MODELOS DE SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE DE AGUA EN EL SUELO EN CULTIVOS HORTÍCOLAS

Sánchez de Oleo, C.<sup>1</sup>, Jaramillo, C.<sup>2</sup>, Illera, I.<sup>3</sup>, Lidón, A.<sup>4</sup>, Ramos, C.<sup>5</sup>, Ginestar, D.<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Profesor, Escuela de Física, Universidad Autónoma de Santo Domingo, C/ Alma Mater, Santo Domingo, República Dominicana, [matematicacarlo@hotmail.com](mailto:matematicacarlo@hotmail.com)

<sup>2</sup> Doctoranda Dpto. Producción Vegetal, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera S/N 46022 Valencia, [ilem750128@hotmail.com](mailto:ilem750128@hotmail.com)

<sup>3</sup> Estudiante, ETSICC, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera S/N 46022 Valencia, [ivilgme@cam.upv.es](mailto:ivilgme@cam.upv.es)

<sup>4</sup> Profesor, Grupo Re-Forest, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universitat Politècnica de València. Camino de Vera, S/N 46022 Valencia, [alidon@qim.upv.es](mailto:alidon@qim.upv.es)

<sup>5</sup> Investigador, Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias, Apdo. Oficial, 46113 Moncada (Valencia), [ramos\\_carmon@gva.es](mailto:ramos_carmon@gva.es)

<sup>6</sup> Profesor, Instituto de Matemática Multidisciplinar. Universitat Politècnica de València. Camino de Vera, S/N 46022 Valencia, [dginesta@mat.upv.es](mailto:dginesta@mat.upv.es)

### Resumen

El uso de modelos de simulación de la dinámica del agua en el suelo requiere del conocimiento de un gran número de parámetros, algunos de los cuales son difíciles de medir y es necesaria su calibración a partir de medidas experimentales. Por ello, es conveniente elegir aquellos parámetros que mayor incidencia tienen en los procesos a estudiar, simplificando con ello el proceso de calibración del modelo. En este trabajo se propone la utilización de métodos de análisis de sensibilidad global para determinar los parámetros más influyentes en los errores de la predicción del contenido de humedad del suelo de dos modelos de simulación con diferente grado de complejidad, LEACHM y EU-Rotate\_N. Se ha hecho uso de los valores medidos de la humedad del suelo en dos ensayos de cultivo de coliflor en dos años consecutivos, utilizando los datos del primer ensayo para la calibración de ambos modelos y los datos del segundo ensayo para evaluar la capacidad predictiva de los mismos una vez calibrados. Los resultados muestran que es posible obtener buenas predicciones calibrando solo un número reducido de parámetros.

### 1- Introducción

Los modelos de simulación que describen el comportamiento del agua y nitrógeno en el suelo son herramientas útiles para planificar estrategias de manejo del riego y la fertilización, de forma que sin mermas de la producción se minimicen algunos de los problemas ambientales derivados de estas prácticas agrícolas (Cannavo *et al.* 2008; Kersebaum *et al.* 2007). El uso de estos modelos de simulación requiere del conocimiento de un gran número de parámetros, algunos de los cuales son difíciles de medir y es necesaria su calibración a partir de medidas

experimentales (*Jung et al. 2010*) y, probablemente, esta es la razón por la cual los modelos de simulación se utilizan raramente como herramienta de apoyo a la gestión del riego y otras prácticas agrícolas como la fertilización. Además, es conocido que los modelos con un gran número de parámetros variables, pueden presentar problemas de sobreparametrización y sobreajuste de los datos (*Makowski et al. 2006*).

Por otra parte, la calibración de modelos con un elevado número de parámetros requiere de un gran número de medidas experimentales que en ocasiones son difíciles y costosas de obtener a partir de experimentos de campo. Por ello, es conveniente elegir aquellos parámetros que mayor incidencia tienen en los procesos a estudiar, simplificando con ello el proceso de calibración del modelo. El objetivo de este trabajo es proponer un análisis de sensibilidad de dos modelos que simulan el transporte de agua en sistemas agrícolas, y su utilización para la calibración de estos modelos a partir de medidas del contenido de agua en el suelo obtenidas en parcelas de coliflor cultivadas en dos años consecutivos.

## 2- Material y métodos

Los datos utilizados para calibrar los dos modelos se obtuvieron de un experimento llevado a cabo en dos plantaciones comerciales de coliflor en Paterna (Valencia, 39°29'32,12" N y 0°26'21,19" W, 14 metros sobre el nivel del mar). El suelo es profundo sin piedras, de textura franco arcillosa en las dos primeras capas (0-15 cm y 15-30 cm) y arcillo-limosa en la tercera capa considerada en el ensayo (30-45 cm). La materia orgánica variaba entre 35 g kg<sup>-1</sup> en la capa superficial y 16 g kg<sup>-1</sup> en las capas más profundas. La densidad aparente del suelo osciló entre 1128 kg m<sup>-3</sup> en la primera capa y 1600 kg m<sup>-3</sup> en la tercera capa. En la Tabla 1 se recogen las principales características del suelo de las dos parcelas del ensayo.

**Tabla 1.** Propiedades del suelo en las dos parcelas del ensayo.

Propiedades	Profundidad (cm)		
	0 – 15	15 – 30	30 – 45
Textura (%)			
Arena	67	35	24
Limo	17	35	39
Arcilla	16	30	37
Clase textural (USDA)	Franco arenoso	Franco arcilloso	Franco arcilloso
Carbono orgánico (g C kg <sup>-1</sup> )	9.0	8.0	8.0
Nitrógeno orgánico (g N kg <sup>-1</sup> )	1.0	0.9	0.9
pH (KCl)	7.5	7.5	7.5
Capacidad intercambio catiónico (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	8.8	12.1	-
Densidad aparente (Mg m <sup>-3</sup> )	1.29	1.60	1.72

La coliflor se trasplantó el 17 de septiembre de 2012 en la parcela 1 y el 15 de septiembre de 2013 en la parcela 2. La distancia entre filas fue de 0.64 m y la



separación entre plantas de 0.67 m. La coliflor se cosechó el 20 de febrero de 2013 en la parcela 1 y el 15 de febrero de 2014 en la parcela 2. El riego fue por surcos utilizando agua del río Turia y la lámina de agua aplicada fue medida en cada riego. La lluvia se registró en una estación meteorológica situada cerca de las parcelas. En cada parcela se tomaron muestras de suelo a tres profundidades coincidentes con las capas de suelo anteriormente mencionadas. Los muestreos tuvieron una periodicidad de 15-21 días dependiendo de la época, y se prolongaron hasta el inicio del siguiente cultivo. En cada muestra se determinó, entre otras variables, la humedad del suelo mediante secado del suelo a 105°C.

Para simular la dinámica de agua se utilizaron dos modelos diferentes implementados en los códigos LEACHM y EU-Rotate\_N. El modelo del código LEACHM (*Wagenet & Hutson, 1989*) es un modelo que describe el régimen de agua y transporte de solutos en suelos no saturados o parcialmente saturados. La dinámica del agua se obtiene de la resolución de la ecuación de Richards y de las ecuaciones de Campbell para establecer las relaciones entre la humedad, el potencial matricial y la conductividad hidráulica del suelo. La calibración de este modelo implica la determinación de los parámetros  $a$  y  $b$  de Campbell así como de la conductividad hidráulica saturada del suelo,  $K_{hsat}$ , en cada una de las capas de suelo consideradas.

El código EU-Rotate\_N (*Rahn et al. 2007*) se ha desarrollado en el marco de un proyecto europeo y consiste en un conjunto de módulos que simulan el crecimiento de las plantas, la dinámica del nitrógeno y del agua en el suelo. Para describir la dinámica del agua se utiliza un modelo compartimental de tipo “tipping bucket”, que hace uso de un menor número de parámetros que los modelos de tipo físico. Los parámetros básicos del modelo son el contenido de agua a capacidad de campo (FC), a saturación (SAT), en el punto de marchitez permanente (PWP) y los coeficientes de drenaje (CD), que determinan la transferencia de agua entre las distintas capas. La evapotranspiración del cultivo se calcula con el método FAO (*Allen et al. 1998*), siendo necesario disponer de la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) y los correspondientes coeficientes de cultivo.

Para reducir el número de parámetros a calibrar en cada uno de los modelos se ha tomado como referencia las medidas experimentales de humedad volumétrica en cada una de las capas de suelo consideradas y se ha construido una función que mide el error de la predicción de cada uno de los modelos:

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^{ncapas} \frac{(\sum_{j=1}^{nmed} (\theta_{vij} - \theta_{vij}^*)^2)^{1/2}}{(\sum_{j=1}^{nmed} (\theta_{vij})^2)^{1/2}}, \quad (1)$$

donde  $ncapas$  es el número de capas de suelo consideradas (tres en este caso),  $nmed$  es el número de medias de humedad en cada capa,  $\theta_{vij}$  es la medida  $j$ -ésima de la humedad volumétrica en la capa  $i$ -ésima y  $\theta_{vij}^*$  es el valor  $j$ -ésimo de la humedad volumétrica en la capa  $i$ -ésima predicho por el modelo. Utilizando este valor del error se ha hecho un análisis de sensibilidad global de los parámetros hidráulicos de ambos modelos, determinando aquellos parámetros que más influyen en la variabilidad del error. Se ha comparado el funcionamiento de dos métodos de

análisis de sensibilidad. El método LH-OAT (*Jung et al. 2010*) y el método FAST (*Cannavó, 2012*). En el primero de ellos se consideran  $p$  parámetros para los que se dispone de un valor máximo y mínimo, y cada intervalo se divide en  $N$  subintervalos. Se realiza un muestreo mediante el método del hipercubo latino y en cada punto del muestreo se varían de uno en uno los  $p$  parámetros, construyendo el índice de sensibilidad  $I_i$  para cada parámetro  $e_i$  calculado como:

$$I_i = \sum_{j=1}^N \frac{|M(e_{1j}, \dots, e_{ij}(1+f_i), \dots, e_{pj}) - M(e_{1j}, \dots, e_{ij}, \dots, e_{pj})|}{N \times f_i \times M(e_{1j}, \dots, e_{ij}, \dots, e_{pj})}, \quad (2)$$

donde  $M()$  hace referencia a la función que define el modelo,  $f_i$  es la fracción de cambio introducida en el parámetro  $i$  y  $j$  hace referencia a un punto del muestreo.

El método FAST (Fourier Amplitude Sensitivity Test) (*Cukier et al. 1973*) se basa en una descomposición de la varianza, de forma que se cuantifica la contribución de cada uno de los parámetros del modelo a la varianza total. Si  $Y = M(e_1, \dots, e_p)$  es la función que define el modelo en estudio, el método FAST estima los índices de sensibilidad de primer orden como

$$S_i = \frac{\text{Var}(E(Y|e_i))}{\text{Var}(Y)}, \quad (3)$$

donde  $E(Y|e_i)$  es el valor esperado del resultado del modelo si el parámetro  $e_i$  se fija a un valor dado. Para evaluar estos índices de sensibilidad de primer orden se han de calcular integrales múltiples. El método FAST realiza un muestreo en el espacio de parámetros y una transformación de los mismos que permite reducir las integrales múltiples a integrales unidimensionales utilizando las series de Fourier. Los detalles del método pueden ser consultados en *Saltelli et al. (1999)*. Los cálculos realizados en este trabajo se han obtenido utilizando la librería GSAT que se describe en *Cannavó (2012)*.

Los parámetros seleccionados para realizar el análisis de sensibilidad de cada uno de los modelos y su rango de variación estimado se presentan en la Tabla 2. Los valores del resto de parámetros de ambos modelos se fijaron al valor por defecto de cada uno de los códigos.

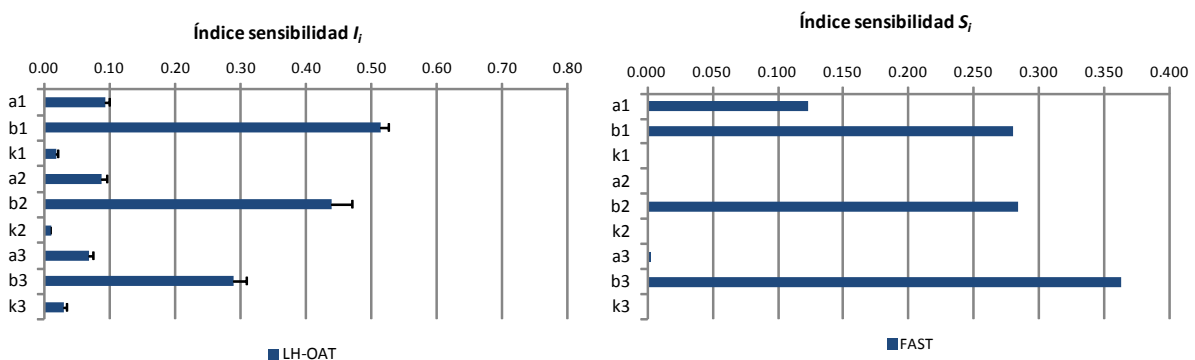
Una vez identificados los parámetros más sensibles de los modelos, se procedió a su calibración, dejando el resto de parámetros con el valor medio del rango de variación considerado. La calibración se llevó a cabo obteniendo los valores de los parámetros que hacen mínima la función de error (1) mediante el método simplex de Nelder-Mead (*Lagarias et al. 1998*). En concreto se utilizó la función *fminsearch* del paquete MATLAB. La bondad del proceso de calibración se ha medido utilizando los estadísticos diferencia media, RMSE, NRMSE y coeficiente de correlación de la regresión de los valores medidos frente a los predichos por el modelo (*Lidón et al. 2013*).

**Tabla 2.** Parámetros hidráulicos evaluados en cada uno de los modelos.

Parámetro	Símbolo	Unidades	Valor inferior	Valor superior
<i>Modelo LEACHM</i>				
Parámetro <i>a</i> ec. Campbell capa 0-15	a1	kPa	-0.149	-10.000
Exponente <i>b</i> ec. Campbell capa 0-15	b1	-	0.140	10.000
Conductividad hidráulica saturada capa 0-15	k1	mm/día	264	13400
Parámetro <i>a</i> ec. Campbell capa 15-30	a2	kPa	-0.149	-10.000
Exponente <i>b</i> ec. Campbell capa 15-30	b2	-	0.140	20.000
Conductividad hidráulica saturada capa 15-30	k2	mm/día	264	13400
Parámetro <i>a</i> ec. Campbell capa 30-45	a3	kPa	-0.149	-10.000
Exponente <i>b</i> ec. Campbell capa 30-45	b3	-	0.140	25.000
Conductividad hidráulica saturada capa 30-45	k3	mm/día	264	13400
<i>Modelo EU-Rotate_N</i>				
Humedad a capacidad de campo capa 0-15	FC1	cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	0.150	0.350
Humedad de saturación capa 0-15	SAT1	cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	0.400	0.550
Coefficiente de drenaje capa 0-15	CD1	-	0.100	1.000
Humedad a capacidad de campo capa 15-30	FC2	cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	0.150	0.300
Humedad de saturación capa 15-30	SAT2	cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	0.400	0.470
Coefficiente de drenaje capa 15-30	CD2	-	0.100	1.000
Humedad a capacidad de campo capa 30-45	FC3	cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	0.150	0.300
Humedad de saturación capa 30-45	SAT3	cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	0.350	0.400
Coefficiente de drenaje capa 30-45	CD3	-	0.100	1.000

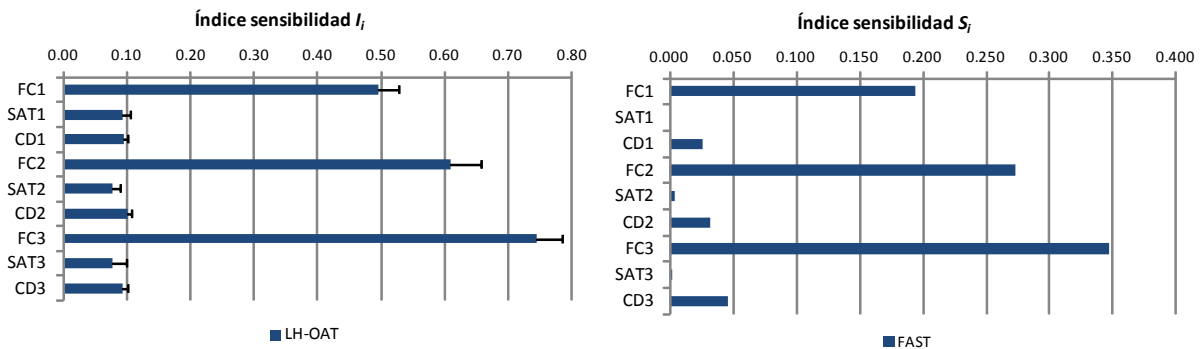
### 3- Resultados y discusión

Se han estudiado los índices de sensibilidad de la función error (1) respecto de los parámetros mostrados en la Tabla 2. Para el método LH-OAT se han obtenido los índices de sensibilidad usando 50 niveles en el intervalo de variación de los parámetros y 5 repeticiones. En las Figuras 1 y 2 se muestra la media de los índices obtenidos junto con la barra de error asociada a cada desviación típica. En estas Figuras también se muestran los índices de sensibilidad de primer orden para los distintos parámetros de los modelos calculados mediante el método FAST.



**Figura 1.** Índices de sensibilidad de los parámetros hidráulicos del modelo LEACHM obtenidos mediante LH-OAT y FAST.





**Figura 2.** Índices de sensibilidad de los parámetros hidráulicos del modelo EU-Rotate\_N obtenidos mediante LH-OAT y FAST.

Para el modelo LEACHM ambos análisis de sensibilidad muestran que los parámetros que más afectan al error en la predicción del contenido de agua en el suelo son el exponente de la ecuación de Campbell para cada una de las capas consideradas, mientras que para el modelo EU-Rotate\_N los parámetros más influyentes son la humedad a capacidad de campo de cada una de las capas de suelo. Por tanto, éstos son los parámetros seleccionados para el proceso de calibración de los modelos. En la Tabla 3 se muestran los valores iniciales y los valores obtenidos tras el proceso de calibración para los parámetros seleccionados para cada modelo. Los estadísticos obtenidos para la calibración de la lámina de agua calculada con los dos modelos (Tabla 4) muestran que el ajuste obtenido para ambos modelos fue bueno, dado el bajo valor de NRMSE y la baja diferencia media obtenida en cada modelo.

**Tabla 3.** Parámetros calibrados en cada modelo.

Modelo	Parámetro	Valor inicial	Valor calibrado
LEACHM	b1	5.138	5.512
	b2	6.138	9.876
	b3	7.000	19.357
EU-Rotate_N	FC1	cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	0.250
	FC2	cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	0.270
	FC3	cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	0.250

**Tabla 4.** Estadísticos de la calibración de los modelos LEACHM y EU-Rotate\_N.

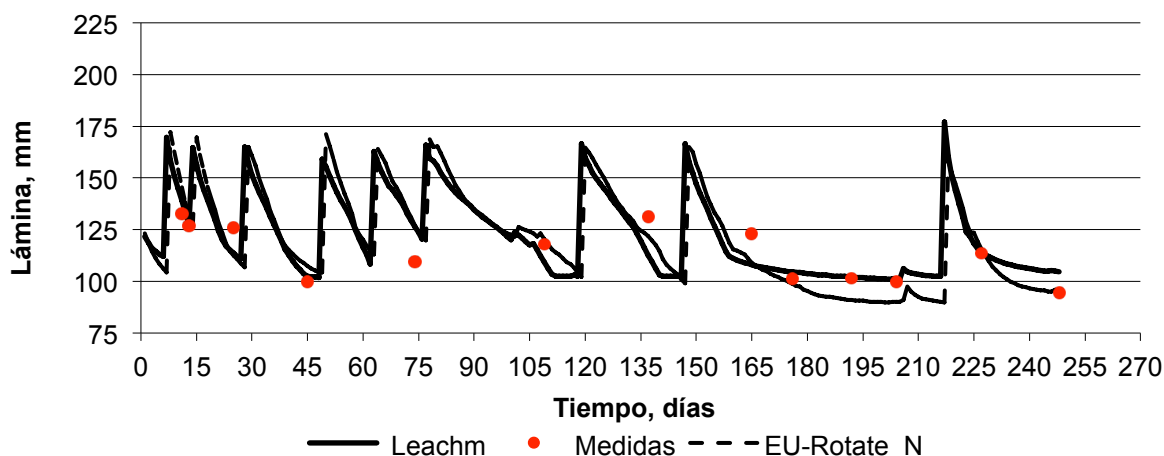
	Lámina (mm) 0-45 cm	
	LEACHM	EU-Rotate_N
Diferencia media	-2.8	1.5
RMSE	12.5	13.2
NRMSE	0.10	0.11
r	0.727	0.888

Para evaluar la capacidad predictiva de los modelos una vez calibrados, se fijaron los valores de los parámetros calibrados con los datos del ensayo 1 y se

predijo la lámina de agua y la humedad volumétrica en cada capa para el ensayo 2 en la segunda parcela. En la Figura 3 se muestran los valores predichos por ambos modelos y los medidos a lo largo del ensayo, y en la Tabla 5 se recogen los estadísticos obtenidos en la predicción de la lámina de agua. Se observa como utilizando sólo tres parámetros en el proceso de calibración, se obtienen resultados con una precisión adecuada para utilizar los modelos como herramientas predictivas en situaciones similares a las de la calibración.

**Tabla 5.** Estadísticos de la predicción de los modelos LEACHM y EU-Rotate\_N para el ensayo 2.

	Lámina (mm) 0-45 cm	
	LEACHM	EU-Rotate_N
Diferencia media	0.9	3.0
RMSE	8.3	7.8
NRMSE	0.07	0.07
r	0.686	0.799



**Figura 3.** Lámina de agua simulada y medida en el perfil del suelo (0-45 cm) a lo largo del cultivo de coliflor correspondiente al ensayo 2.

#### 4- Conclusiones

Los modelos de simulación de la dinámica del agua en el suelo presentan un gran número de parámetros que es necesario ajustar a partir de medidas experimentales que no siempre son fáciles de obtener. Es necesario disponer de metodologías que permitan reducir el número de parámetros a ajustar para evitar la sobreparametrización del modelo. En este trabajo se ha propuesto la utilización de índices de sensibilidad global de los modelos utilizando como variable el error cuadrático medio entre los valores predichos y medidos para determinar los parámetros más sensibles. Estos parámetros se han utilizado en un proceso de calibración para determinar la humedad del suelo en una parcela cultivada con coliflor. Los dos métodos de sensibilidad utilizados han dado como resultado los mismos parámetros dominantes que, una vez calibrados, han permitido predecir con una precisión razonable el contenido de agua en el suelo, tanto para en el ensayo de

campo utilizado para calibrar el modelo como en el ensayo utilizado para evaluar la capacidad predictiva de los mismos. Esto posibilita la utilización de estos modelos para mejorar las recomendaciones de manejo del agua en parcelas bajo regadío.

## 5- Agradecimientos

Este trabajo ha sido subvencionado parcialmente por el Ministerio de Economía y Competitividad mediante el proyecto INIA-RTA 2011–00136-C04-01.

## 6- Bibliografía

- Allen, R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. (1998). Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper n° 56, FAO, Roma.
- Cannavó F. (2012). Sensitivity analysis for volcanic source modeling quality assessment and model selection. *Computers & Geosciences*, 44, 52–59.
- Cannavo, P., Recous, S., Parnaudeau, V., Reau, R. (2008). Modeling N dynamics to assess environmental impacts of cropped soils. *Advances in Agronomy* 97, 131–174.
- Cukier, R.I., Fortuin, C.M., Shuler, K.E., Petschek, A.G., Schaibly, J.H. (1973). Study of the sensitivity of coupled reaction systems to uncertainties in rate coefficients. I theory. *The Journal of Chemical Physics* 59, 3873–3878.
- Jung, Y.W., Oh, D.S., Kim, M., Park, J.W. (2010). Calibration of LEACHN model using LH-OAT sensitivity analysis. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 87, 261–275.
- Kersebaum, K.C., Hecker, J.M., Mirschel, W., Wegehenkel, M. (2007). Modelling water and nutrient dynamics in soil–crop systems: a comparison of simulation models applied on common data sets. In: Kersebaum, K.C., Hecker, J.M., Mirschel, W., Wegehenkel, M. (Eds.), *Modelling Water and Nutrient Dynamics in Soil–Crop Systems*. Springer, Dordrecht, The Netherlands, pp. 1–17.
- Lagarias, J.C., Reeds J.A., Wright M.H., Wright P.E. (1998). Convergence Properties of the Nelder-Mead Simplex Method in Low Dimensions. *SIAM Journal of Optimization*, 9, 112–147.
- Lidón, A., Ramos, C., Ginestar, D., Contreras, W. (2013). Assessment of LEACHN and a simple compartmental model to simulate nitrogen dynamics in citrus orchards. *Agricultural Water Management*, 121, 42–53.
- Makowski, D., Hillier, J., Wallach, B., Andrieu, B., Jeuffroy, M.H. (2006). Parameter estimation for crop models. In: D. Wallach et al. (eds.): *Working with dynamic crop models*. Amsterdam. Elsevier, 101–149.
- Rahn, C., Zhang, K., Lillywhite, R., Ramos, C., Doltra, J., De Paz, J. M., Riley, H., Fink, M., Nendel, C., Thorup Kristensen, K., Pedersen, A., Piro, F., Venezia, A., Firth, C., Schmutz, U., Rayns, F., Strohmeyer, K. (2010). EU-Rotate\_N—a decision support system—to predict environmental and economic consequences of the management of nitrogen fertiliser in crop rotations. *European Journal of Horticultural Science*, 75, 20–32.
- Saltelli, A., Tarantola, S., Chan, K.S. (1999). A quantitative model-independent method for global sensitivity analysis of model output. *Technometrics*, 41, 39–56.
- Wagenet, R.J., Hutson, J.L. (1989). LEACHM: Leaching Estimation and Chemistry Model: A Process Based Model of Water and Solute Movement, Transformations, Plant Uptake and Chemical Reactions in the Unsaturated Zone. Ver. 2. Water Resour. Inst. Cornell University, Ithaca, New York.





## EFFECTO DE LA FRECUENCIA DE RIEGO SOBRE LA EFICIENCIA DEL RIEGO Y LA PRODUCCIÓN DE UN CULTIVO DE FRESA

Gavilán, P.<sup>1</sup>, Ruiz, N.<sup>2</sup>, Lozano, D.<sup>3</sup>, Bohórquez, J.M.<sup>4</sup>, Molina, F.<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Investigador Titular. IFAPA Centro Alameda del Obispo, Apdo. 3092, 14080 Córdoba, [pedrod.gavilan@juntadeandalucia.es](mailto:pedrod.gavilan@juntadeandalucia.es)

<sup>2</sup> Técnica Especialista Contratada. IFAPA Centro Alameda del Obispo. Apdo. 3092, 14080 Córdoba, [natividad.ruiz.baena@juntadeandalucia.es](mailto:natividad.ruiz.baena@juntadeandalucia.es)

<sup>3</sup> Investigador contratado. IFAPA Centro Alameda del Obispo, Apdo. 3092, 14080 Córdoba, [david.lozano@juntadeandalucia.es](mailto:david.lozano@juntadeandalucia.es)

<sup>4</sup> Técnico Especialista Contratado. IFAPA Centro Alameda del Obispo. Apdo. 3092, 14080 Córdoba, [juanm.bohorquez@juntadeandalucia.es](mailto:juanm.bohorquez@juntadeandalucia.es)

<sup>5</sup> Director Departamento Agronómico. Gat Fertilíquidos, Niebla (Huelva). [pacomolina@gatfertiliquidos.com](mailto:pacomolina@gatfertiliquidos.com)

### Resumen

Este experimento ha permitido conocer los efectos del riego por pulsos de diferente duración y frecuencia sobre la eficiencia del riego y la producción de un cultivo de fresa. El trabajo se realizó sobre un suelo arenoso del entorno de Doñana. Se hizo un ensayo con cuatro tratamientos y cuatro repeticiones. Los tres primeros fueron regados diariamente con la misma cantidad de agua, aplicando pulsos de 5 (T1), 10 (T2) y 15 (T3) minutos de duración. El cuarto tratamiento (T4) recibió el riego de la parte comercial de la finca, con pulsos diarios de 15 minutos aproximadamente. En el tratamiento T3 se obtuvieron ahorros de agua del 44% sin pérdida de producción, con respecto a la parte comercial de la finca (T4), y pérdidas de cosecha de tan solo el 3% para el de pulsos de duración intermedia (10 minutos). El tratamiento de pulsos más cortos, T1, experimentó una pérdida de producción del 7%, probablemente como consecuencia de la menor uniformidad de distribución del riego en estas condiciones y, por tanto, un mayor déficit hídrico en algunos puntos del invernadero. Por tanto, podemos concluir que los pulsos de riego entre 10 y 15 minutos serían los más aconsejables en este tipo de suelos. Además, pulsos muy cortos, como los del T1, deberían ser evitados. La eficiencia del riego del tratamiento más productivo (T3) fue del 79%, mientras que la finca tuvo una eficiencia media del 42%. Las producciones superaron los 1,000 g planta<sup>-1</sup> en el tratamiento de pulsos "largos" (T3) y en el T4. Además, las eficiencias en el uso del agua obtenidas en los diferentes tratamientos fueron muy similares, situándose alrededor de 23 Kg m<sup>-3</sup>.

### Summary

The effect on crop yield of several daily drip-irrigation frequencies was investigated for strawberry (*Fragaria x anannasa*) on sandy soil for one experiment conducted during 2013 to 2014 irrigation season. T1, T2 and T3 treatments were daily irrigated with 5, 10, and 15 minutes irrigation pulses and the same overall irrigation time. Therefore, these treatments received the same amount of irrigation water. T4 was daily irrigated according to the irrigation practices of the farmer. Irrigation frequency had little effect on yield. In all treatments production exceeded 900 g plant<sup>-1</sup>, resulting in 3% and 7% reductions of significant yield of T2 and T1 treatments with respect to T3 and T4. No significant differences

were detected between T3 and T4 treatments. Probably, the fall of T1 and T2 yields were due to a water stress induced by the distribution uniformity decrease when high irrigation frequencies were applied. These results suggest that 15 minutes irrigation pulses are adequate for this type of soils. There was no yield benefit for short time irrigation pulses and, therefore, they were not advisable. T3 irrigation efficiency was 79% versus 42% for T4. In all irrigation treatments water use efficiency were around 23 Kg m<sup>-3</sup>.

## 1- Introducción

Es bien conocido que el riego localizado aumenta la eficiencia del riego al humedecer sólo la parte del suelo más cercana al sistema radicular (Bresler y col., 1982). Además, la frecuencia y descarga de los emisores determina el potencial de agua en el suelo y, por tanto, la distribución radicular y absorción de agua por las raíces (Coelho y Or, 1999). La frecuencia de riego óptima depende de factores tales como la textura del suelo, la extensión de sistema radicular, el frente de humedecimiento alrededor de las raíces, la evapotranspiración y el tipo de cultivo (Hanson y col., 2003). Los riegos frecuentes mantienen relativamente constante la humedad del suelo a lo largo del tiempo. Como desventaja, riegos diarios de muy alta frecuencia dan lugar a mayores tiempos de llenado de los laterales de riego y frecuente drenaje de los mismos después del corte del riego, lo que provoca problemas de baja uniformidad del riego como demostraron Lozano y col. (2014) en un experimento realizado sobre un cultivo de fresa en el entorno del P.N. de Doñana. Por el contrario, riegos poco frecuentes pueden causar estrés hídrico entre riegos en suelos de textura muy arenosa debido a la baja capacidad de almacenamiento de agua de estos suelos, lo que provoca una elevada percolación profunda por debajo de la zona explorada por las raíces. Desde la perspectiva del agricultor, un riego de menos frecuencia es más fácil de manejar, aunque este problema puede ser evitado con el uso de programadores de riego, y resulta más intuitivo.

Los laterales de riego por goteo usados en el cultivo de la fresa aplican entre 2.5 y 5 l h<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>. Considerando un espaciamiento típico entre laterales de 1.1 m, esto supone láminas de riego aplicadas que varían entre 2.3 y 4.5 mm h<sup>-1</sup>. Las necesidades de agua del cultivo en los meses de máxima demanda pueden alcanzan valores superiores a 5 mm d<sup>-1</sup> (Gavilán y col.<sup>a</sup>, 2014), que se deben cubrir, suponiendo una eficiencia del riego del 85%, con riegos de hasta 6 mm d<sup>-1</sup>. El riego con cintas de 5 l h<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup> supone, por tanto, tiempos de riego de hasta 80 minutos al día para cubrir las necesidades de agua del cultivo. Un riego de 160 minutos al día sería necesario si se usara una sola cinta de 2.5 l h<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>. En la comarca del entorno del P.N. de Doñana son frecuentes los suelos arenosos, con un contenido de arena superior al 90% en algunos casos. Si el suelo explorado por las raíces no puede almacenar la mayoría del agua aplicada, parte de la misma se perderá por drenaje y la eficiencia del riego no será la óptima (Asolane y col., 2006). Por tanto, la aplicación de pulsos de riego de corta duración puede mejorar la eficiencia del riego (Batchelor y col., 1996).

Sin embargo, existe bastante incertidumbre sobre el efecto que tiene la duración y el número de pulsos de riego sobre la uniformidad de distribución (UD), la eficiencia del riego y la producción del cultivo de la fresa en la provincia de Huelva. Hanson y col. (2003) estudiaron el efecto de la frecuencia de riego sobre diferentes cultivos hortícolas (lechuga, pepino, cebolla y tomate de industria). Estudios similares fueron realizados previamente por Bucks y col. (1974), Freeman y col. (1976), Bucks y col. (1980), y Hutmacher y col., (1985). Por su parte, Linnemannstöns y col. (2013) realizaron un estudio similar sobre un cultivo de fresón. Durante la campaña de riegos 2013/2014, se realizó un estudio en condiciones de campo del efecto del uso de cintas de diferente caudal sobre la UD, cuando se aplicaban diferentes tiempos de riego, a escala de invernadero (Lozano y col., 2014) y sector de riego (Gavilán, 2014). El trabajo demostró que, a escala de sector de riego, tiempos de riego

superiores a 10 minutos fueron necesarios para obtener valores de UD del 85%, cuando se usaron cintas de  $5 \text{ l h}^{-1} \text{ m}^{-1}$ , las más frecuentes en la zona. Tiempos de riego de 5 minutos dieron lugar a UD del 79%. Por tanto, en principio, un riego de 10 minutos sería la duración mínima del pulso que se debería aplicar para alcanzar una uniformidad calificada como “buena” cuando se utilizan cintas de  $5 \text{ l h}^{-1} \text{ m}^{-1}$ . Dando pulsos de riego de mayor duración (15 y 20 minutos) llegaron a obtenerse valores de UD del 93%. Sin embargo, desconocemos el efecto que tiene la aplicación de pulsos de riego de diferente duración sobre la eficiencia de éste y la cosecha.

Los objetivos de este trabajo fueron: 1) la determinación de la duración óptima del pulso de riego cuando se cubren completamente las necesidades de agua del cultivo, es decir, en condiciones de riego no deficitario en relación con la eficiencia del riego y la producción 2) el cálculo de la productividad del agua de riego y de la eficiencia en el uso del agua para diferentes duraciones del pulso de riego.

## 2. Material y métodos

El ensayo se realizó en el T.M. de Almonte, cerca de la “Aldea de El Rocío”, sobre una parcela comercial de fresón (*Fragaria x ananasa*) de la variedad *Sabrina* propiedad de la empresa SUREXPORT S.L. El suelo de la zona del ensayo se clasifica como arenoso (clasificación USDA), con un 90% de arena y un 10% de arcilla. La empresa realizó todas las labores de cultivo propias del cultivo (incluyendo el abonado). El manejo del riego fue responsabilidad del IFAPA. Además, la empresa se ocupó del manejo del riego necesario para construir los caballones, para mantener la estructura de los mismos antes del transplante y del riego por aspersión aplicado para asegurar el establecimiento de la planta tras el transplante. El transplante se realizó el 11 de octubre de 2013, con una densidad de plantación de  $72,000 \text{ plantas ha}^{-1}$ , aproximadamente. Los invernaderos fueron instalados el 11 de noviembre de 2013. La campaña finalizó el día 15 de mayo de 2014, cuando se dejó de recoger fruta de primera, destinándose a partir de ese momento toda la producción a industria.

A excepción del fertirriego, las plantas del ensayo recibieron las mismas labores que la parte comercial de la finca, no realizándose tareas de reposición de marras distintas a las realizadas por el agricultor. La recogida de la fruta se realizó de acuerdo con el calendario de recolección del resto de la finca, lo que no supuso ninguna ventaja para el ensayo en relación con el resto de la finca. Además, el cálculo de la producción por unidad de planta se realizó sin considerar el número de plantas muertas que se produjo a lo largo del experimento. Por tanto, los resultados del ensayo pueden ser perfectamente extrapolables al resto de la explotación, dado que podríamos calificarlo como un ensayo en condiciones de campo.

Se realizó un ensayo con cuatro tratamientos, con un diseño de bloques al azar con cuatro repeticiones. La unidad experimental fue un túnel completo de  $70 \times 6.6 \text{ m}^2$ , por tanto, en el ensayo se compuso de 16 túneles, con una superficie total de  $7,392 \text{ m}^2$ . Los tres primeros tratamientos estuvieron diseñados para cubrir completamente las necesidades de agua del cultivo, utilizando una eficiencia de riego del 85%. Al primer tratamiento (T1) se aplicaron pulsos de 5 minutos, mientras que en el segundo y el tercero se dieron pulsos de 10 y 15 minutos, respectivamente. Por último, el tratamiento 4 correspondió al riego realizado en el resto de la finca, con pulsos de 15 minutos de duración aproximadamente, lo que permitió comparar las producciones con la producción comercial normalmente obtenida. El sistema de riego estaba compuesto por laterales de riego por goteo no autocompensante, con un espaciamiento entre emisores de 0.20 m, capaces de aplicar  $5 \text{ l h}^{-1} \text{ m}^{-1}$  a una presión de trabajo de 0.85 bar. Los datos de cosecha fueron analizados estadísticamente usando

técnicas de análisis de la varianza. El test LSD fue usado para identificar tratamientos que fueran estadísticamente diferentes en producción.

La programación de riegos se realizó mediante el método de balance de agua en el suelo (Allen y col., 1998), utilizando la evapotranspiración de referencia estimada dentro de invernadero ( $ET_{o\ inv}$ ) a partir del forzado del cultivo y valores del coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) recomendados por Gavilán y col. (2014)<sup>a</sup>, calculados en función de la cobertura del cultivo, que alcanzó un valor máximo de 1.0 al final de la campaña, cuando el valor de cobertura máxima fue del 82%. La  $ET_{o\ inv}$  se estimó usando un modelo basado en la radiación solar dentro de los túneles (Fernández y col., 2010), utilizando para ello el pronóstico meteorológico de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Diariamente, se comprobaban los valores del pronóstico con los estimados usando los datos meteorológicos medidos dentro de un invernadero que formaba parte del ensayo (Gavilán y col., 2014)<sup>b</sup>. Para ello, se usó una estación meteorológica automática capaz de medir la temperatura y humedad relativa del aire (sonda HMP 45C, Vaisala<sup>1</sup>) y la radiación solar (piranómetro CM3, Kipp and Zonen), controladas por un datalogger CR10X (Campbell Scientific), perteneciente a la Red SIAR en Andalucía (Gavilán y col., 2008). Estos valores se muestran diariamente en Internet en la Web del IFAPA ([www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/ifapa/ria](http://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/ifapa/ria)).

Para medir la evapotranspiración actual del cultivo ( $ET_c$ ) se instalaron en una repetición de cada uno de los tratamientos lisímetros de drenaje, realizados en poliéster reforzado con fibra de vidrio de 1.40 m x 0.60 m x 0.60 m. La cantidad de agua aplicada a cada uno de los tratamientos fue medida utilizando contadores. Se instaló un contador en cabeza de cada tratamiento, lo que permitió conocer el volumen aplicado en los cuatro túneles que componían cada uno de ellos. Además, en los lomos donde se situaban los lisímetros, se instalaron contadores para medir la cantidad de agua aplicada a los mismos y, a partir de ese dato, calcular la cantidad que se suministraba al lisímetro. Más detalles sobre el experimento pueden consultarse en Gavilán y col. (2014)<sup>a</sup>.

La humedad en el suelo se midió en cada uno de los tratamientos usando sondas capacitivas ECH2O (Decagon Devices<sup>1</sup>) y una sonda EasyAG (Sentek Technologies<sup>1</sup>) colocadas entre plantas. En ambos ensayos se monitorizaron en total 4 puntos de los diferentes tratamientos con las primeras, mientras que la segunda fue usada para monitorizar el contenido de humedad del tratamiento T1. La sonda EasyAG se conectó vía remota a un servidor de Internet, de manera que los valores de humedad del suelo pudieron ser visualizados de forma remota, lo que facilitó la toma de decisiones de riego. Los valores de humedad del suelo se utilizaron para corregir el almacenamiento semanal de humedad en el suelo al estimar los valores de  $ET_c$ , así como para conocer el contenido de humedad en cada uno de los tratamientos a lo largo del ciclo del cultivo. Esto permitió, además, ajustar el riego en función de las variaciones de humedad del suelo debidas a las condiciones meteorológicas que se produjeron a lo largo de la campaña.

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1 Riego aplicado en cada uno de los tratamientos

El calendario de riegos fue modificado a lo largo de la campaña en función de las condiciones meteorológicas y la humedad del suelo con el objetivo de aplicar el riego necesario para cubrir completamente las necesidades de agua del cultivo. La cantidad de

---

<sup>1</sup> La información suministrada de marcas comerciales es meramente informativa y no supone la adhesión de los autores del trabajo a las mismas ni ningún indicador de su calidad.

fertirriego aplicado fue de 3,982, 4,137 y 4,057 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> en los tratamientos T1, T2 y T3, respectivamente (Tabla 1). Las diferencias de volúmenes de riego aplicados a estos tres primeros tratamientos fueron inferiores al 4%, lo que puede considerarse adecuado en función de la incertidumbre de la medida realizada con los caudalímetros. El mes completo en que menos agua se aplicó fue noviembre (311 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> al T2), mientras que en abril se alcanzaron los valores máximos de agua aplicada (971 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> al T2).

Por su parte, la finca aplicó (T4) 7,301 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, un 80% más de lo aplicado a la media de los tres primeros tratamientos. La diferencia entre el riego de la finca y el de los tres primeros tratamientos es consecuencia de los hábitos de riego de la finca y la falta de aplicación de un calendario de riegos basado en las condiciones meteorológicas y de cultivo. Por ejemplo, cuando se producen lluvias abundantes, los agricultores tienden a reducir el riego instintivamente, mientras que no lo hacen cuando hay días nublados y fríos sin precipitación, en los que la evapotranspiración también se ve reducida aunque no haya lluvias. Esto se puede apreciar si se comparan los valores de riego aplicado en esta misma finca durante las campañas de ensayos 2012/2013 y 2013/2014 en los meses de noviembre y marzo, meses con diferentes cantidades de lluvia en ambas campañas (las lluvias acumuladas caídas en estos dos meses fueron de 294 y 31 mm en la primera y segunda campaña, respectivamente). Los valores de ET<sub>o</sub> fueron también superiores durante la campaña 2012/13, 429 frente a 398 mm de la campaña 2013/2014. Sin embargo, los tratamientos de riego óptimo no se vieron afectados por este hecho y la menor cantidad de riego aplicado fue consecuencia de una mejor gestión del mismo y no de las diferentes condiciones meteorológicas. Como se verá al analizar los datos de producción, esta última campaña ha sido calificada como “más seca”, sin embargo se ha aplicado menos riego en los tratamientos de riego óptimo y las producciones han sido mayores que en la campaña anterior (datos no mostrados).

**Tabla 1.** Riego, evapotranspiración del cultivo (ET<sub>c</sub>), valor máximo del coeficiente de cultivo, (K<sub>c max</sub>), eficiencia del riego, producción, productividad del agua y eficiencia del uso del agua en los diferentes tratamientos del ensayo.

Tratamiento	Riego (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	ET <sub>c</sub> (mm)	Eficiencia del riego	K <sub>c max</sub>	Producción (g planta <sup>-1</sup> )	Productividad del agua (kg m <sup>-3</sup> )	Eficiencia en el uso del agua (Kg m <sup>-3</sup> )
T1	3,982	293	0.74	1.0	943 <sup>b</sup>	17.2	23.4
T2	4,137	301	0.73	1.0	986 <sup>b</sup>	17.3	23.8
T3	4,057	319	0.79	1.0	1,016 <sup>a</sup>	18.2	23,2
T4	7,301	-	0.42*	-	1,018 <sup>a</sup>	10.1*	24.4*

\* Valores estimados usando un valor de ET<sub>c</sub> igual a la media de los tratamientos T1, T2 y T3.

### 3.2 Evapotranspiración y coeficientes de cultivo

Durante el ensayo, la evapotranspiración de referencia, suma de los valores obtenidos al aire libre (ET<sub>o</sub>) y bajo plástico (ET<sub>o inv</sub>), a lo largo de la campaña de riegos fue de 429 mm. El valor de ET<sub>o</sub> FAO-56 al aire libre fue de 518 mm. La precipitación registrada en la estación meteorológica de Almonte, perteneciente a la Red de Información Agroclimática de Andalucía, fue durante este mismo periodo de 336 mm. Esta última cifra se suministra como un indicador de la aridez de la campaña en que se realizó el experimento. La evapotranspiración de cultivo media medida con los lisímetros (ET<sub>c</sub>) fue de 304 mm, variando desde 293 mm (T1) hasta 319 mm (T3). Sin embargo, estas diferencias no pueden ser calificadas como significativas dada la ausencia de medidas de lisimetría en todas las



repeticiones. Las diferencias se debieron fundamentalmente a pequeñas variaciones en el crecimiento de las plantas dentro de los lisímetros. El mes de máxima evapotranspiración fue abril, en el que se alcanzó un valor acumulado de  $91 \text{ mm mes}^{-1}$ , mientras que en noviembre el valor alcanzado fue de  $7 \text{ mm mes}^{-1}$ . La evapotranspiración de cultivo media a lo largo de la campaña fue de  $1.5 \text{ mm d}^{-1}$ . La  $ET_c$  estimada que se utilizó en la programación de los riegos fue de 271 mm, inferior al valor medido en todos los tratamientos.

Para el cálculo del coeficiente de cultivo real se utilizó el cociente entre la  $ET_c$ , medida a través del balance de agua en los lisímetros de drenaje, y la  $ET_{o \text{ inv}}$ . El coeficiente de cultivo inicial se situó en torno a 0.1, cuando la cobertura alcanzó valores del 10%, aproximadamente a primeros de noviembre. Este coeficiente ascendió de manera progresiva hasta mediados de enero, alcanzándose valores cercanos a 0.6, con coberturas cercanas al 50%. A partir de ese momento creció más lentamente hasta alcanzar en marzo valores de 0.7, con coberturas del 50%. Finalmente, se produjo una nueva subida hasta alcanzar valores de  $K_c$  iguales a 1 al final del ciclo, con una cobertura máxima superior al 82%. Estos valores resultan bastante consistentes con los determinados durante la campaña 2012/2013 (Gavilán y col., 2014<sup>a</sup>).

### 3.3 Eficiencia del riego

El conocimiento de la eficiencia del riego es un indicador de la cantidad de agua aprovechada por las plantas en relación con el total de agua aplicada mediante el riego. Además, indirectamente, es un indicador de la eficiencia del uso de los fertilizantes, pues el agua de drenaje lleva en nutrientes en disolución aportados por el fertirriego, provocando lo que se denomina contaminación difusa. Lo cierto es que existen muy pocos valores medidos de eficiencia del riego en los cultivos de fresa. Gavilán y col. (2014) en un experimento realizado en esta misma finca durante la campaña 2013/2014 midieron eficiencias de riego del 58, 67 y 83%, cuando se aplicaron riegos de 7,957, 6,876 y 5,610  $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$ , respectivamente. Los valores que aparecen en la literatura de eficiencia en el riego localizado son meramente informativos, por tanto deben tomarse con cautela a la hora de manejar el riego y, en todos los casos, deben ser contrastados en la realidad. Así, un valor objetivo de eficiencia del riego del 85% resulta difícil de alcanzar sin un manejo adecuado del mismo, sobre todo en suelos muy arenosos, como los que existen en el entorno del Parque Nacional de Doñana.

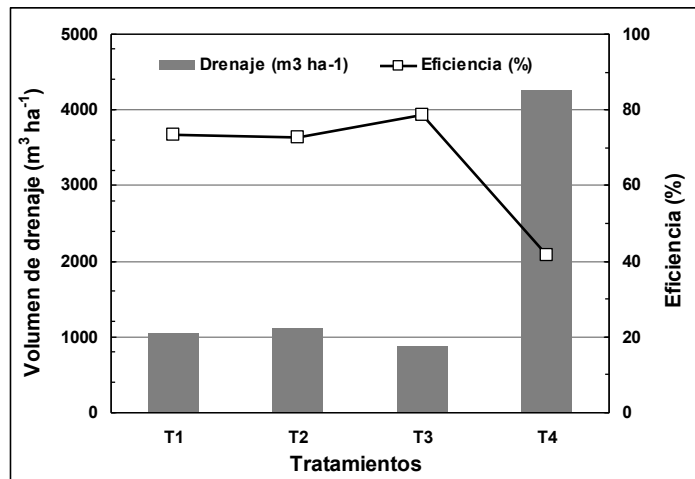
En contra de lo esperado, el tratamiento que alcanzó la máxima eficiencia fue el T3 con un valor medio anual del 79%, cercano al valor objetivo con el que se hizo la programación de riegos, que fue del 85%. Este valor es comparable al citado por Fernández y col. (2012) para el cultivo de la judía en el ciclo de otoño de los invernaderos del Poniente de Almería (suministro relativo de agua –RIS– igual a 1.18) e incluso superior al del cultivo del pepino en esa misma zona (RIS igual a 1.62). La eficiencia del riego fue variable a lo largo de la campaña, partiendo de valores inferiores al 20% inmediatamente después de la plantación del cultivo, alcanzando valores en torno al 80% a partir del mes de febrero, y con valores máximos superiores al 95% a partir del mes de mayo. Los tratamientos T1 y T2 tuvieron eficiencias medias anuales del 74 y el 73%, respectivamente. Finalmente, el valor estimado de eficiencia del riego del T4, correspondiente al riego de la finca, fue del 42%.

Los datos anteriores pueden compararse con la campaña anterior si consideramos su finalización el día 15 de mayo de 2013. Se observa que el tratamiento de riego óptimo de la primera (T1) tuvo una eficiencia del 77%, muy similar a las eficiencias obtenidas en los ensayos de riego óptimo de esta campaña (que variaron entre el 73 y el 79%). Sin embargo, la eficiencia del riego aplicado en la finca (T4) durante la campaña 2012/2013 fue



ligeramente superior (47%) a la de esta última, como consecuencia del menor riego aplicado en la primera, como se ha explicado anteriormente.

En la Figura 1 podemos ver la diferencia entre un riego de 4,000 m<sup>3</sup>/ha (tratamientos T1, T2 y T3) y uno de aproximadamente 7,300 m<sup>3</sup>/ha (tratamiento T4). Supone pasar de una eficiencia de hasta el 79% u otra del 42%, e implica una reducción de los volúmenes de agua y fertilizantes en torno al 45%. Además, en términos de impacto ambiental, la Figura 1 nos muestra los volúmenes de drenaje. Estos indican que en T4 la contaminación difusa es más del triple que la medida en T3. Por tanto, un riego de 7,300 m<sup>3</sup>/ha contaminaría prácticamente tres veces más de lo que lo haría uno de 4,000 m<sup>3</sup>/ha. Comparando estos resultados con los de la campaña pasada a fecha 15 de mayo, podemos ver que los tratamientos de riego óptimo de la campaña 2013/2014 produjeron un drenaje medio de 999 m<sup>3</sup>/ha, del mismo orden del producido en la campaña anterior (971 m<sup>3</sup>/ha). Por su parte, la finca aumentó el drenaje en un 21%, pasando de 3,494 a 4,241 m<sup>3</sup>/ha de drenaje (Datos no presentados).



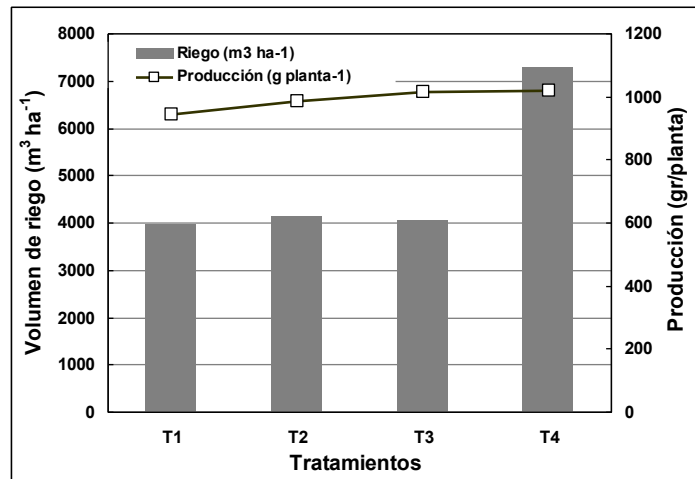
**Figura 1.** Volúmenes de drenaje (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>) y eficiencia del riego (%) en los diferentes tratamientos del ensayo de la finca Corraliza durante la campaña 2013/2014.

### 3.4 Producciones, productividad del agua y eficiencia en el uso del agua

En todos los tratamientos la producción de primera fue superior a 900 g planta<sup>-1</sup> (Figura 2). La máxima producción de los tratamientos con riego óptimo se obtuvo en el tratamiento de pulsos largos (T3), con un valor de 1,016 g planta<sup>-1</sup> (equivalente a una producción de 7.3 kg m<sup>-2</sup>). Esta no fue significativamente diferente de la obtenida en el tratamiento que recibió un riego idéntico al del resto de la finca (T4), 1018 g planta<sup>-1</sup>, a pesar de que este tratamiento aplicó un 80% más de agua que el T3 (Tabla 1). Los tratamientos de pulsos más cortos, T1 y T2, tuvieron producciones de 943 y 986 g planta<sup>-1</sup>, no existiendo diferencias significativas entre ellos. Sin embargo, las diferencias de estos dos últimos tratamientos fueron significativamente diferentes de T3 y T4. A pesar de ello, el ahorro de agua y fertilizantes de T1 y T2 respecto a T4, un 45 y un 43%, respectivamente, podría justificar la merma de producción, que viene siempre a producirse a partir del mes de abril, cuando los precios de la fruta han disminuido considerablemente (datos no presentados). De cualquier forma, es importante destacar, por tanto, que se apreciaron pocas diferencias entre los tratamientos que recibieron cantidades iguales de agua con pulsos de diferente duración, al contrario de lo que podría pensarse a priori. Incluso, el tratamiento de pulsos

“largos” fue significativamente más productivo, alcanzando al valor de referencia de la finca (T4). Es posible que bajo condiciones de riego óptimo, el incremento de la uniformidad de distribución que se produce al aplicar pulsos más largos compense la pérdida de eficiencia que se produce como consecuencia de una mayor percolación profunda.

La productividad del agua de riego en cada uno de los tratamientos fue de 17.2, 17.3, 18.2, 10.1 kg m<sup>-3</sup>, para los tratamientos T1, T2, T3 y T4, respectivamente. La productividad del agua de los tratamientos de riego óptimo (T1, T2 y T3) fue similar a la del riego del cultivo pimiento y de la judía en los invernaderos sin climatizar del Poniente de Almería (Fernández y col., 2012). Finalmente, las eficiencias en el uso del agua, calculadas como la relación entre la producción y la ET<sub>c</sub>, obtenidas en los cuatro tratamientos fueron muy similares, oscilando entre 23 y 24 kg m<sup>-3</sup>.



**Figura 2.** Volumen de riego aplicado (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>) y producción (g planta<sup>-1</sup>) en cada tratamiento del ensayo de la finca Corraliza durante la campaña 2013/2014.

#### 4. Conclusiones y recomendaciones

De los resultados anteriores se pueden extraer varias conclusiones. En primer lugar, la utilización de un calendario de riego basado en datos meteorológicos, coeficientes de cultivo y control de la humedad del suelo se han mostrado herramientas muy útiles a la hora de obtener ahorros significativos de agua sin pérdida de producción respecto a la parte comercial de la finca. Así se han llegado a obtener ahorros de agua del 44% sin pérdida de producción en el tratamiento de pulsos largos y pérdidas del 3% para el de pulsos intermedios (10 minutos de duración del pulso de riego), con ahorros de agua del 43%. El tratamiento de pulsos más cortos, T1, experimentó una mayor pérdida de producción (alrededor del 7%), probablemente como consecuencia de la caída de la UD del riego en estas condiciones y, por tanto, al aumento de déficit de riego en algunos puntos del campo. Por tanto, podemos concluir que pulsos de riego de 15 minutos serían los más aconsejables en este tipo de suelos. Además, pulsos muy cortos de riego, como los del T1, deberían ser evitados. El coeficiente de cultivo medido estuvo fuertemente influenciado por la cobertura del cultivo. El K<sub>c</sub> máximo alcanzó valores de 1, con coberturas del 82%. La eficiencia del riego del tratamiento con riego óptimo más productivo (T3) fue del 79%, mientras que la finca tuvo una eficiencia del 42%. Esto último indica que un 58% del agua aplicada no fue utilizada por el cultivo. Todos los tratamientos tuvieron producciones superiores a 900 g planta<sup>-1</sup>. Las producciones superaron los 1,000 g planta<sup>-1</sup> en el tratamiento de pulsos “largos” (T3) y en el regado como la parte comercial de la finca. Las diferencias entre los tratamientos que recibieron cantidades iguales de agua con pulsos de diferente duración



fueron relativamente pequeñas, como podría pensarse a priori. Incluso, el tratamiento de pulsos “largos” fue igual de productivo que el correspondiente al riego de la finca y más productivo que los tratamientos T1 y T2. Además, las eficiencias de riego y las eficiencias en el uso del agua obtenidas fueron muy similares en los tratamientos T1, T2 y T3. Es posible que bajo condiciones de riego óptimo, el incremento de la uniformidad de distribución que se produce al aplicar pulsos más largos compense la pérdida de eficiencia que se produce como consecuencia de una mayor percolación profunda.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto CONECTA-SAR (PP.TRA.TRA2013), cofinanciado con fondos FEDER. Además, ha sido cofinanciado por la empresa SUREXPORT S.L. Agradecemos a Andrés Morales y a los técnicos de esta empresa María José, Mari Luz y Juan su colaboración en este trabajo.

## 5. Bibliografía

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., (1998) Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO irrigation and drainage paper 56. FAO, Roma.
- Assouline, S., Möller, M., Cohen, S., Ben-Hur, M., Grava, A., Narkis, K., Silber, A., 2006. Soil-Plant System Response to Pulsed Drip Irrigation and Salinity: Bell Pepper Case Study. *Soil Science Society of American Journal*, 70:1556-1568.
- Batchelor, C., Lovell, C., Murata, M., 1996. Simple microirrigation techniques for improving irrigation efficiency of vegetable gardens. *Agricultural Water Management*. 32:37–48.
- Bresler, E., McNeal, B.L., Carter, D.L., 1982. Saline and sodic soils. *Advances Series in Agricultural Sciences*. Vol. 10. Springer-Verlag. Berlin.
- Bucks, D.A., Erie, L.J., French, O.R., 1974. Quantity and frequency of trickle and furrow irrigation for efficient cabbage production. *Agronomy Journal*, 66(1):53–57.
- Bucks, D.A., Erie, L.J., French, O.F., Nakayama, F.S., Pew, W.D., 1980. Subsurface trickle irrigation management with multiple cropping. *Trans. Amer. Soc. Agr. Eng.* 24(2):1482–1489.
- Coelho, E.F., Or, D. 1999. Root distribution and water uptake patterns of corn under surface and subsurface drip irrigation. *Plant Soil* 206:123–136.
- Fernández, M.D., Thompson, R., Bonachela, S., Gallardo, M., Granados, M.R., 2012. Uso del agua de riego en los cultivos en invernadero. *Cuaderno de Estudios Agroalimentarios*, Julio 2012: 115-138.
- Fernández, M.D., Bonachela, S., Orgaz, F., Thompson, R., López, J.C., Granados, M.R., Gallardo, M., Fereres, E., 2010. Measurement and estimation of plastic greenhouse reference evapotranspiration in a Mediterranean climate. *Irrigation Science* 28:497-509.
- Freeman, I., Blackwell, J., Garzoli, K.V., 1976. Irrigation frequency and total water applications with trickle and furrow systems. *Agricultural Water Management*. 1:21–31.
- Gavilán, P., 2014. Evaluación de la uniformidad de cintas de riego en condiciones de campo. Elección del tiempo de riego más adecuado. Jornada Técnica “Mejora y uso del agua de riego en el cultivo de la fresa”. Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera. Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural. Junta de Andalucía. Sevilla, Noviembre 2014. (Disponible en [www.servifapa.es](http://www.servifapa.es)).



- Gavilán, P., Estévez, J., Berengena, J., 2008. Comparison of standardized reference evapotranspiration equations in Southern Spain. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 134(1):1-12.
- Gavilán, P., Lozano, D., Ruiz, N., 2014<sup>a</sup>. El riego de la fresa en el entorno de Doñana. Evapotranspiración, coeficientes de cultivo y eficiencia del riego. XXXII Congreso Nacional de Riegos. Madrid, 10 al 12 de junio de 2014.
- Gavilán, P., Ruiz, N., Lozano, D., 2014<sup>b</sup>. Estimación de la evapotranspiración del cultivo de la fresa basada en pronósticos meteorológicos. Validación con datos experimentales. V Jornadas de Agrometeorología. Valencia 13 y 14 de noviembre de 2014.
- Hanson, B.R., May, D.M., Schwankl, L.J., 2003. Effect of irrigation frequency on subsurface drip irrigated vegetables. *HortTechnology*, 13(1):115-120.
- Hutmacher, R.B., Vail, S.S., Muthamia, J.G., Mwaja, V., Liu., R.C., 1985. Effect of trickle irrigation frequency and installation depth on tomato growth and water status, p. 798–804. In: *Drip/Trickle Irrigation in Action*, Proc. 3rd Intl. Drip/Trickle Irrigation Congress.
- Linnemannstöns, T., Ançay, A., Baroffio, C.A., 2013. Strawberry drip-irrigation in plastic tunnel – effects of irrigation frequency on water use, yield and fruit quality. *Proceedings of International Strawberry Congress*, 4-6 September 2013, Antwerp, Belgium.
- Lozano, D., Ruiz, N., Gavilán, P., 2014. Evaluación en campo de cintas de riego por goteo de diferente caudal en un cultivo de fresa. *Agricultura*, noviembre 2014:778-781.

## RESPUESTA DEL CULTIVO DE ALCACHOFA MULTIPLICADA POR SEMILLA A DIFERENTES DOSIS DE RIEGO

Baixauli, C<sup>(1)</sup>., Aguilar, J.M<sup>(1)</sup>., Giner, A<sup>(1)</sup>., Nájera, I<sup>(1)</sup>., Pomares, F<sup>(2)</sup>., Tarazona, F<sup>(2)</sup>., Estela, M<sup>(2)</sup>

<sup>1</sup> Investigador. Fundación Cajamar Comunidad Valenciana. Camino del Cementerio nuevo s/n. 46200 Paiporta (Valencia). [carlosbaixauli@cajamar.com](mailto:carlosbaixauli@cajamar.com)

<sup>2</sup> Investigador. Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias. Carretera Moncada-Náquera, km 4.5. 46113 Moncada (Valencia). [pomares\\_fer@gva.es](mailto:pomares_fer@gva.es)

### Resumen

El objetivo de la experiencia fue evaluar los efectos de tres dosis de riego en diferentes parámetros productivos y cualitativos de una variedad de alcachofa multiplicada por semilla en riego por goteo.

El ensayo se realizó en el Centro de Cajamar en Paiporta (Valencia). La plantación de alcachofa de semilla, cv. *Symphony F<sub>1</sub>* (Nunhems), se efectuó el 22/7/2010, con un marco de plantación de 1.67 x 0.78 m (0.77 pl m<sup>-2</sup>). Las plantas se sometieron a tres aplicaciones con ácido giberélico a 60 ppm en las fechas: 6/9/10, 21/9/10 y 6/10/10, respectivamente. La recolección se realizó desde el 4/11/10 al 17/5/11. Las dosis de riego aplicadas se calcularon en base a la ET<sub>c</sub>, a partir de la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>), obtenida siguiendo el método Penman-Monteith y los coeficientes de cultivo (K<sub>c</sub>), con valores de 0.35, 1.20 y 1.05, durante los periodos inicial, intermedio y final, respectivamente. Los volúmenes de agua aplicados fueron: 2.943, 4.305 y 6.031 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, en los tratamientos R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub>, respectivamente. La lluvia contabilizada durante el ciclo del cultivo fue de 374 mm. Estas dosis de riego resultan equivalentes al 68, 100 y 140% de la ET<sub>c</sub>, para las distintas dosis analizadas.

Se aplicó el mismo abonado en las tres dosis de riego a base de 166 kg N ha<sup>-1</sup>, 60 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> y 110 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>, en forma de nitrato amónico, ácido fosfórico y sulfato potásico, respectivamente.

Los resultados de rendimiento comercial acumulado indican que la dosis de riego afectó de forma significativa a los valores registrados en los meses de febrero, marzo, abril y mayo. Si bien entre la dosis R<sub>2</sub> y R<sub>3</sub> las diferencias no resultaron estadísticamente significativas.

Los restantes parámetros del cultivo (peso medio de los capítulos y componentes del destrío) resultaron poco afectados por la dosis de riego.

### 1. Introducción

El agua es uno de los factores de la producción más limitantes en los agrosistemas, siendo el riego de los cultivos el principal sector consumidor de agua. Por lo que ante la acusada escasez de este recurso natural, resulta imperiosamente necesario utilizar el agua de riego de la forma más eficiente posible.

Para establecer un programa racional de riego en alcachofa multiplicada por semilla, que cubra sus necesidades con las mínimas pérdidas posibles, es de primordial importancia conocer las necesidades de riego de este cultivo en las condiciones reales de los agrosistemas.

Ensayos previos realizados por este mismo grupo de trabajo, desarrollado en la finca experimental de Cajamar en Paiporta, con el cv. multiplicado por semilla *Imperial Star* en la campaña 2001-2002, en la que se compararon 3 dosis de riego, se obtuvieron los mejores resultados productivos con las dosis media y alta (5.472 y 7.265 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, respectivamente) respecto a la dosis baja (4.104 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>) (Baixauli y Maroto 2011; Pomares *et al.*, 2003). El

objetivo de este ensayo fue evaluar los efectos de tres dosis de riego en el rendimiento y calidad comercial del cultivo de alcachofa de semilla en riego por goteo.

## 2. Material y métodos

La siembra del cv. *Symphony* (Nunhems) se realizó en semillero profesional sobre bandeja rellena de una mezcla de turba rubia y fibra de coco de 270 alvéolos el 8 de junio de 2010, siendo sometido a una pregerminación en cámara a una temperatura de 27°C y una humedad relativa del 90%. Posteriormente las plántulas fueron repicadas a bandejas de 104 alvéolos cuando tenían entre 4 a 6 hojas verdaderas donde se desarrollaron hasta el momento del trasplante. La plantación se efectuó el 22/7/2010, con un marco de 1.67 x 0.78 m (0.77 pl m<sup>-2</sup>) con sistema de riego localizado (por goteo). Posteriormente se efectuaron tres aplicaciones de ácido giberélico a 60 ppm adicionando al caldo un abono foliar (Abofol) a una concentración de 1 gr l<sup>-1</sup>, realizando el primer tratamiento cuando las plantas tenían 6 y 10 hojas totalmente desarrolladas, en las fechas: 6/9/10, 21/9/10 y 6/10/10, respectivamente, con un gasto de caldo de unos 375 l ha<sup>-1</sup>. Para el cálculo de las dosis de riego se siguió el método propuesto por Doorenbos y Pruitt (1997), obteniendo la ET<sub>c</sub> a partir de la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>), según el método Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) y los valores de coeficientes de cultivo (K<sub>c</sub>) de 0.35, 1.20 y 1.05, durante los períodos inicial, intermedio y final, y una duración en días de los referidos períodos de 35, 98, 119 y 28, para la fase inicial, de desarrollo, intermedia y final, respectivamente, aplicando los volúmenes de agua siguientes: 2.943, 4.305 y 6.031 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, en los tratamientos R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub>, respectivamente. La lluvia contabilizada durante el ciclo del cultivo fue de 374 mm, equivalente a 3.740 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>. Estas dosis de riego resultan equivalentes al 68, 100 y 140% ET<sub>c</sub>, para R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub> y R<sub>3</sub>, respectivamente. Se aplicó el mismo abonado en las tres dosis de riego a base de 166 kg N ha<sup>-1</sup>, 60 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> y 110 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>, en forma de nitrato amónico, ácido fosfórico y sulfato potásico respectivamente. Durante el cultivo en el período de invierno se produjeron varias heladas los días 4, 16, 17 y 28 de diciembre de 2010 con -2.5, -3, -1, -4 y -1°C, respectivamente y los días 22, 23, 24 y 25 de enero de 2011, con -4, -1.5, -2 y -1°C, respectivamente, que afectó a los capítulos, al desarrollo de la planta y al rendimiento final, aunque por igual en todos los casos.

Se realizó un diseño estadístico de bloques al azar con 3 repeticiones, con 9 plantas por parcela elemental. Para el análisis estadístico se empleó el programa estadístico Stat. Graphics Plus.

Para cada una de las dosis de riego se contabilizó la producción comercial acumulada por meses durante el período productivo (desde el 4/11/10 al 17/5/11), el peso medio de sus capítulos, la producción de destrío como consecuencia de capítulos pequeños y deformes, de destrío por presencia de brácteas abiertas y el destrío total acumulado por meses. A lo largo del cultivo se hicieron 3 valoraciones del vigor de las plantas, la primera el 6 de septiembre, la segunda el 11 de noviembre de 2010 y la última el 15 de abril de 2011, adjudicándoles una puntuación desde 1 (para las hileras con muy poco vigor), hasta 5 (para aquellas en las que sus plantas fueron muy vigorosas).

## 3. Resultados y discusión

Respecto al rendimiento de los capítulos comerciales, los valores obtenidos con las dosis de riego media (R<sub>2</sub>) y alta (R<sub>3</sub>) fueron más altos para la producción acumulada total, que los obtenidos con la dosis baja (R<sub>1</sub>), registrándose diferencias significativas a nivel estadístico (d.s.n.e.) con una probabilidad p<0.01; en cambio, durante el período productivo desde febrero hasta mayo, no se apreciaron d.s.n.e. entre la dosis baja (R<sub>1</sub>) y la alta (R<sub>3</sub>) en la producción acumulada de febrero, marzo y abril, pero sí entre la dosis media (R<sub>2</sub>) y la baja (R<sub>1</sub>) para los meses de febrero, marzo y abril con una probabilidad p<0.10, p<0.05 y p<0.01,





\* Los valores medios seguidos de letras mayúsculas, minúsculas o minúsculas cursiva en cada columna indican diferencias significativas a  $p < 0.01$ ,  $p < 0.05$  y  $p < 0.10$ , respectivamente. n.s. indica ausencia de diferencias significativas a  $p < 0.10$ .

En cuanto a la producción de destrío, únicamente se encontraron diferencias significativas en el rendimiento de destrío acumulado por capítulos pequeños y deformes correspondiente al mes abril (tabla 3) y en el rendimiento de capítulos abiertos correspondiente a mayo (tabla 4).

**Tabla 3.** Efecto de la dosis de riego en el destrío por capítulos pequeños y deformes acumulado mensualmente

Rendimiento destrío por capítulos pequeños y deformes ( $\text{kg m}^{-2}$ )							
Tratamiento	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
R1	0.01	0.01	0.03	0.03	0.04	0.13 <i>a</i>	0.30
R2	0.00	0.00	0.09	0.01	0.01	0.02 <i>b</i>	0.22
R3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00 <i>b</i>	0.19
	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	$p < 0.10$	n.s.

\* Los valores medios seguidos de letras mayúsculas, minúsculas o minúsculas cursiva en cada columna indican diferencias significativas a  $p < 0.01$ ,  $p < 0.05$  y  $p < 0.10$ , respectivamente. n.s. indica ausencia de diferencias significativas a  $p < 0.10$ .

**Tabla 4.** Efecto de la dosis de riego en el destrío por capítulos abiertos acumulado mensualmente

Rendimiento destrío por capítulos abiertos ( $\text{kg m}^{-2}$ )							
Tratamiento	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
R1	0.01	0.01	0.03	0.03	0.05	0.07	0.17 <i>b</i>
R2	0.00	0.02	0.04	0.04	0.04	0.04	0.25 <i>a</i>
R3	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.13 <i>b</i>
	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	$p < 0.10$

\* Los valores medios seguidos de letras mayúsculas, minúsculas o minúsculas cursiva en cada columna indican diferencias significativas a  $p < 0.01$ ,  $p < 0.05$  y  $p < 0.10$ , respectivamente. n.s. indica ausencia de diferencias significativas a  $p < 0.10$ .

**Tabla 5.** Efecto de la dosis de riego en el destrío total acumulado mensualmente

Rendimiento destrío total ( $\text{kg m}^{-2}$ )							
Tratamiento	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
R1	0.02	0.02	0.06	0.10	0.13	0.24	0.51
R2	0.02	0.02	0.04	0.08	0.09	0.10	0.51
R3	0.00	0.01	0.02	0.10	0.10	0.11	0.41
	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

\* Los valores medios seguidos de letras mayúsculas, minúsculas o minúsculas cursiva en cada columna indican diferencias significativas a  $p < 0.01$ ,  $p < 0.05$  y  $p < 0.10$ , respectivamente. n.s. indica ausencia de diferencias significativas a  $p < 0.10$ .

Por otra parte, los datos de valoración del vigor de las plantas pusieron de manifiesto un marcado efecto de la dosis de riego en el desarrollo de las plantas, obteniéndose diferencias significativas en las tres valoraciones realizadas durante la fase de crecimiento vegetativo detectando un menor desarrollo de las plantas correspondientes a la dosis de riego más baja (R<sub>1</sub>) (tabla 6).

**Tabla 6.** Efecto de la dosis de riego en el vigor (escala de 0-5) de las plantas de alcachofa

Tratamiento	Vigor 6/9/10	Vigor 11/11/10	Vigor 15/4/11
R1	1.08 B	3.25 b	3.83 B
R2	2.33 A	3.42 ab	4.83 A
R3	2.75 A	3.50 a	5.00 A
	p<0.01	p<0.05	p<0.01

\* Los valores medios seguidos de letras mayúsculas, minúsculas o minúsculas cursiva en cada columna indican diferencias significativas a  $p<0.01$ ,  $p<0.05$  y  $p<0.10$ , respectivamente. n.s. indica ausencia de diferencias significativas a  $p<0.10$ .

#### 4. Conclusiones

Los resultados de rendimiento comercial acumulado indican que la dosis de riego afectó de forma significativa a los valores registrados en los meses de febrero, marzo, abril y mayo. Si bien entre la dosis media ( $R_2$ ) y alta ( $R_3$ ), las diferencias no resultaron estadísticamente significativas.

Los restantes parámetros del cultivo (peso medio de los capítulos y componentes del destrío) resultaron poco afectados por la dosis de riego.

La dosis de riego afectó de forma altamente significativa al vigor de la plantas, pero entre las dosis de riego media y alta, las diferencias no resultaron significativas.

#### 5. Bibliografía

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage. Paper 56. FAO, Roma.

Baixauli, C., Maroto, J. V. (2011). Cultivares de alcachofa propagable por semilla, respuesta al ácido giberélico. Nuevas variedades de reproducción por semilla y técnicas de producción en alcachofa. Ed. Académica Española, 258 pp.

Doorenbos, J., Pruitt, W.O. (1977). Las necesidades de agua de los cultivos. Estudio FAO. Riego y Drenaje 24. Roma, 194 pp.

Pomares, F., Baixauli, C., Aguilar, J.M., Giner, A., Tarazona, F., Estela, M. (2003). Memoria de Actividades 2002. Resultados de Ensayos Hortícolas. Efecto de diferentes dosis de riego en alcachofa de semilla. Fundación Ruralcaja Valencia, Generalitat Valenciana: pp 381.



## RESPUESTA PRODUCTIVA DE LA CHUFA A DISTINTAS ESTRATEGIAS DE RIEGO Y TIPOS DE PLANTACIÓN

*Pascual-Seva, N.(1), San Bautista, A.(2), López-Galarza, S.(3), Maroto, J.V.(4), Pascual, B.(5)*

<sup>1</sup> Profesora Ayudante Doctor, Universitat Politècnica de València, Centro Valenciano de Estudios sobre el Riego, Departamento de Producción Vegetal, Camino de Vera, s/n 46022 Valencia. [nupasse@prv.upv.es](mailto:nupasse@prv.upv.es).

<sup>2</sup> Profesor Titular de Universidad, Universitat Politècnica de València, Centro Valenciano de Estudios sobre el Riego, Departamento de Producción Vegetal, Camino de Vera, s/n 46022 Valencia. [asanbau@prv.upv.es](mailto:asanbau@prv.upv.es).

<sup>3</sup> Catedrático de Universidad, Universitat Politècnica de València, Centro Valenciano de Estudios sobre el Riego, Departamento de Producción Vegetal, Camino de Vera, s/n 46022 Valencia. [slopez@prv.upv.es](mailto:slopez@prv.upv.es).

<sup>4</sup> Catedrático de Universidad, Universitat Politècnica de València, Centro Valenciano de Estudios sobre el Riego, Departamento de Producción Vegetal, Camino de Vera, s/n 46022 Valencia. [jmaroto@prv.upv.es](mailto:jmaroto@prv.upv.es).

<sup>5</sup> Catedrático de Universidad, Universitat Politècnica de València, Centro Valenciano de Estudios sobre el Riego, Departamento de Producción Vegetal, Camino de Vera, s/n 46022 Valencia. [bpascual@prv.upv.es](mailto:bpascual@prv.upv.es).

### Resumen

La chufa (*Cyperus esculentus* L. var. *sativus* Boeck.) es una planta cultivada para el aprovechamiento de sus tubérculos en la obtención de la horchata. En el presente trabajo se aborda el estudio de su respuesta productiva a distintas estrategias de riego y tipos de plantación. El riego se realiza por surcos, con manejo del mismo en base al contenido volumétrico de agua del suelo (CVAS), mediante el uso de sensores de capacitancia. Las estrategias de riego ensayadas correspondían a iniciar el riego cuando el CVAS alcanzaba valores correspondientes al 45% y al 60% de la capacidad de campo. Respecto a los tipos de plantación, frente al tradicional cultivo en caballones se ha ensayado la plantación en mesetas con dos y tres líneas de plantas. Con las estrategias que suponen el mantenimiento de un mayor CVAS se ha incrementado el rendimiento y el peso unitario de los tubérculos, sin afectar a la eficiencia en el uso del agua de riego. Con respecto a la utilización de mesetas se han obtenido mayores valores del rendimiento y de la eficiencia en el uso del agua de riego, debido esto último especialmente al ahorro en la lámina de agua de riego aportada.

### 1- Introducción y Objetivos del trabajo

La chufa (*Cyperus esculentus* L. var. *sativus* Boeck.) es una planta cultivada en *L'Horta Nord* de Valencia para el aprovechamiento de sus tubérculos en la obtención de la bebida denominada horchata. En la actualidad la superficie dedicada a este cultivo está cercana a 500 ha, con un rendimiento medio de 19.2 t·ha<sup>-1</sup>.

En los países desarrollados la agricultura utiliza aproximadamente el 70% del consumo total de agua dulce, por lo que se considera que estas necesidades son muy elevadas en relación a otros sectores. Hasta la actualidad no se han presentado problemas graves en el abastecimiento de agua de riego en el cultivo de la chufa, siendo probablemente ésta la causa de que se desconozcan las dosis de riego aportadas al cultivo, la eficiencia de aplicación, y la cuantificación de la respuesta productiva de la planta a diferentes aportes hídricos.

En el presente trabajo se aborda el estudio de la respuesta productiva de la chufa a distintas estrategias de riego y tipos de plantación. Se muestran dos estudios realizados en paralelo; en uno se analiza la respuesta del cultivo al riego a distintas estrategias de riego por superficie, en el otro se analiza el comportamiento del cultivo de la chufa en distintas estrategias de plantación.

## **2- Materiales y Métodos**

### **2.1- Cultivo**

Los experimentos se llevaron a cabo en tres campañas sucesivas (2006, 2007 y 2008) en parcelas cercanas al campus de la Universitat Politècnica de València (39° 29' N and 0° 20' W), representativas de las parcelas de la zona de cultivo. De acuerdo con la clasificación agroclimática de Papadakis (Elías y Ruíz, 1977), el clima es subtropical Mediterráneo, con veranos cálidos y secos, con una precipitación anual media de 450 mm distribuida de manera irregular a lo largo del año, ocurriendo especialmente en otoño. La textura del suelo oscila entre francoarenosa y arenosa. El agua de riego procedía de la acequia de Rascanya, procedente del río Turia ( $CE = 1.38 \text{ dS m}^{-1}$ ; SAR (ajustado) = 1.21; pH = 7.2). Debido a la normativa de distribución de agua, el riego de las parcelas sólo era posible de lunes a jueves. Las prácticas culturales seguidas fueron las habituales en la zona (Pascual et al., 1997). El abonado de fondo consistió en el aporte de  $2 \text{ kg m}^{-2}$  de estiércol de ovino (57.2% materia seca; 60.9 materia orgánica) y  $90 \text{ g m}^{-2}$  de abono complejo 15:15:15 (N:  $P_2O_5$ ;  $K_2O$ ) el día antes de la plantación. El abonado de cobertera consistió en  $3.12 \text{ g m}^{-2}$  de N en forma de  $NO_3K$ , aplicado durante los dos primeros riegos del mes de julio en cada año.

En el primer estudio la plantación se realizó el 12 de abril de 2006, 8 de mayo en 2007 y 11 de abril en 2008; en el segundo estudio la plantación tuvo lugar el 12 de abril de 2006, el 9 de mayo de 2007 y el 10 de abril de 2008.

### **2.2-Manejo del riego**

El contenido volumétrico de agua del suelo (CVAS) se monitorizó mediante sensores de capacitancia ECH2O EC-5, con software ECH2O Utility (Decagon Devices Inc., Washington, USA) conectados a un datalogger Em50 (Decagon Devices Inc., Washington, USA). Se colocó un sensor por estrategia de riego, en posición horizontal a 10 cm de profundidad (desde la cima del caballón). Los riegos se planificaron en base a la evolución de los valores del CVAS, ensayándose dos estrategias, H1 y H2. La estrategia H1 consistía en regar cada vez que el CVAS alcanzaba un valor igual al 45% de la capacidad de campo (CC), mientras que en la estrategia H2 se regaba al alcanzar el 60% de la CC. Las variaciones del CVAS fueron utilizadas para determinar in situ los valores correspondientes a la CC (Thompson et al., 2006) en cada parcela y experimento. El manejo de cada riego se realizó siguiendo el criterio del agricultor (de reconocida experiencia). El caudal se midió con un caudalímetro modular área-velocidad ISCO modelo 2150 (Teledyne ISCO Inc., Lincoln, Nebraska, USA) con software Flowlink 4.1 ISCO para Windows (ISCO 2150; Teledyne ISCO Inc., Lincoln, Nebraska, USA; fotografía 2.5). La precipitación fue registrada con pluviómetro (Decagon Devices Inc., Washington, USA) instalado junto al campus de la Universidad Politècnica de Valencia.

En la estrategia H2 se determinó la velocidad de infiltración antes de cada riego mediante un infiltrómetro de surco, construido según la metodología desarrollada por

Boundurant (1957). Los datos obtenidos en cada determinación se ajustaron mediante regresión potencial, obteniéndose los parámetros  $k$  y  $a$  de la ecuación de Kostiakov ( $z = k t^a$ ). El perfil del surco en cada riego se determinó con un perfilómetro construido según Walker y Skogerboe (1987), instalándose antes de cada riego y determinándose el perfil y el perímetro humedecido mediante la representación gráfica y la utilización del software AUTOCAD Map 3D 2010 (Autodesk, 2010), a partir de fotografías tomadas durante el riego (Walker y Skogerboe, 1987). En cada riego, y en 3 surcos en cada riego, se registraron los tiempos de avance y de recesión en cinco puntos del surco, que permitían, por una parte, determinar, las curvas de avance y de recesión reales y por otra estimar los indicadores del riego mediante la utilización del modelo de WinSRFR 3.1 (ALARC, 2009). Con la utilización de este programa, partiendo del parámetro  $a$  de la ecuación de Kostiakov, del caudal de entrada, del tiempo de aplicación, del coeficiente de Manning estimado en cada determinación, y de la lámina neta deseada, se determinaron la eficiencia de aplicación y la uniformidad de distribución.

### 2.3- Estrategias de plantación

La plantación de las mesetas de dos (m) y tres (M) líneas de plantas se realizó con una “sembradora” de tres líneas adaptada a un tractor (en m eliminando una de las salidas de los tubérculos y recortando posteriormente la meseta con la sembradora trabajando en vacío), mientras que para la plantación de los caballones (C) se utilizó un motocultor y una sembradora tradicionales. Las mesetas se realizaron con una anchura tal que permitiera la recolección de los tubérculos con las cosechadoras existentes; concretamente la anchura en la parte alta de la meseta era de 90 cm (120 cm entre ejes) en M y de 50 cm (80 cm entre ejes) en m. En C, los caballones se distanciaron a 60 cm. Las dosis de plantación correspondientes a estos marcos fueron:  $180 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  (M y m), y  $120 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  (C). Los tubérculos se depositaron a aproximadamente 8 cm de profundidad y distanciados a unos 10 cm en las filas, distanciadas a su vez (en m y M) a 30 cm.

La estrategia de riego seguida fue la equivalente a H2. Con el objetivo fundamental (además de conocer la evolución del contenido de humedad del suelo) de comprobar si con el riego se llegaba a humedecer la zona central de la meseta M, se instalaron, horizontalmente a la profundidad de 10 cm, 2 sensores de capacitancia (ECH<sub>2</sub>O EC-5, Decagon Devices Inc., Washington, USA) con software ECH<sub>2</sub>O Utility (Decagon Devices Inc., Washington, USA) conectados a un *datalogger* Em50 (Decagon Devices Inc., Washington, USA), uno en la línea central de una meseta M y el otro en un C. En cada riego se regaban simultáneamente las mesetas y los caballones, con los mismos caudales (totales y unitarios) y tiempos de aplicación.

### 2.4- Diseño experimental y análisis estadístico

En ambos estudios, el diseño experimental fue en bloques al azar, con tres repeticiones. Los resultados han sido analizados mediante análisis de la varianza, utilizando el programa estadístico Statgraphics 5.1 plus (Statistical Graphics Cooperation, 2005). Cuando un efecto ha resultado significativo ( $p \leq 0.05$ ,  $p \leq 0.01$ ) se ha realizado la separación de medias mediante el test LSD a  $p \leq 0.05$ .

## 3- Resultados y discusión

### 3.1- Respuesta del cultivo a las estrategias de riego

En base a las evoluciones de los contenidos de humedad registrados, se determinó el valor de la CC en cada estrategia y experimento, cuyos valores, coincidentes en las dos estrategias de cada experimento, fueron  $0.28$ ,  $0.27$  y  $0.28 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$  en 2006, 2007 y 2008.

En la estrategia H1 se realizaron 11 riegos en cada experimento, con láminas de agua de riego durante todo el ciclo de cultivo de 937, 1008 y 1200 mm en 2006, 2007 y 2008, respectivamente, mientras que en H2 se realizaron 14, 15 y 13 riegos en 2006, 2007 y 2008,



con aportes de 1041, 1201 y 1320 mm. La lluvia supuso unos aportes de 158, 498 y 438 mm, durante los ciclos de cultivo de 2006, 2007 y 2008, respectivamente, siendo la precipitación anual promedio en la zona de 450 mm. Las lluvias registradas en la primavera de 2008 condujeron a la realización de pocos riegos en este período, mientras que las lluvias otoñales de 2007 y 2008 indujeron valores de CVAS mayores que en 2006 en otoño.

Los rendimientos medios obtenidos en la recolección (tabla 1) estuvieron comprendidos entre 1.82 y 2.41 kg·m<sup>-2</sup>, que son del mismo orden o superior al considerado como un buen rendimiento por los agricultores en la zona de producción (2.0 kg·m<sup>-2</sup>). Existieron diferencias (p≤0.05) entre los rendimientos medios obtenidos en los tres experimentos, correspondiendo el mayor valor a 2008 y el menor a 2006, que precisamente se realizaron en la misma parcela; en este sentido, es habitual la obtención de diferentes rendimientos tanto en años distintos en una misma parcela, como en un mismo año en parcelas muy próximas (Pascual et al., 1997). También resultó significativa la estrategia de riego (p≤0.01), con un mayor rendimiento en H2 (p≤0.05), que supuso un mayor aporte hídrico, lo que concuerda con los resultados obtenidos en experimentos paralelos realizados en riego localizado (Pascual-Seva et al., 2015) y que a su vez están de acuerdo con los resultados obtenidos en patata por Shock et al. (1998) y con lo indicado por Fereres (2008) en el sentido de que el rendimiento está estrechamente relacionado con la cantidad de agua aportada. El peso unitario se vio afectado tanto por la estrategia de riego (p≤0.05) como por el año experimental (p≤0.01), resultando significativa su interacción (p≤0.01). Del análisis de esta interacción se deduce que únicamente existieron diferencias entre los pesos unitarios de las dos estrategias, a favor de H2 en 2007 y 2008. Los valores de obtenidos en este estudio son similares a los obtenidos en riego localizado (Pascual-Seva et al., 2015). La eficiencia en el uso del agua de riego (EUAR) no se vio afectada por la estrategia de riego, pero sí por el año de experimentación (p≤0.01), obteniéndose los valores mínimos (1.77 kg·m<sup>-3</sup>) y máximos (1.93 kg·m<sup>-3</sup>) en 2007 y 2008 respectivamente (en ambos casos con la estrategia H1). En cada campaña el incremento del riego supuso un incremento en el rendimiento (p≤0.01), manteniéndose prácticamente constante la EUAR.

**Tabla 1. Efecto del año de experimentación y de la estrategia de riego en el rendimiento en tubérculos, en el peso unitario de los tubérculos y en la eficiencia del uso del agua de riego (EUAR).**

	Rendimiento (kg·m <sup>-2</sup> )	Peso unitario (g)	EUAR (kg·m <sup>-3</sup> )
Año de experimentación (AE)			
2006	1.82 c	0.60 c	1.84 ab
2007	1.95 b	0.64 b	1.77 b
2008	2.41 a	0.66 a	1.91 a
Estrategia de riego (ER)			
H1	1.94 b	0.62 b	1.84
H2	2.18 a	0.64 a	1.84
ANOVA			
Parámetros(g.l.)			
AE (2)	74.3 **	61.6 **	41.6 *
ER (1)	17.1 **	11.7 **	0.1 ns
AE x ER (2)	2.3 ns	16.9 **	2.6 ns
Residual (12)	6.4	9.9	55.7
Desviación estándar	0.09	0.01	0.09

Letras diferentes en una misma columna indican diferencias significativas según el test LSD (p≤0.05); ns: no significativa; \*: Nivel de significación p≤0.05; \*\*: Nivel de significación p≤0.01

Respecto al análisis de la bondad del riego en la estrategia H2, al determinar las funciones de infiltración de Kostiaikov, todos los valores determinados del parámetro *a*, están

dentro del rango 0.40 – 0.69. Todos los coeficientes de determinación obtenidos en los ajustes son elevados (superiores a 0.83), y con niveles de significación  $p \leq 0.01$ . El valor medio del caudal de entrada de los riegos de los experimentos de 2006, 2007, 2008 fue 0.98, 1.60, y 1.91  $L \cdot s^{-1}$ , respectivamente. En ningún caso se observó que se produjera erosión a causa de la velocidad alcanzada por el agua con los caudales utilizados.

Con el programa WinSRFR 3.1 se consiguió una adecuada modelización de los riegos, obteniendo los respectivos valores de eficiencia de aplicación y uniformidad de distribución. Los valores medios de la eficiencia de aplicación conseguidos en todos los experimentos, fueron bajos: 35.4, 30.7 y 25.6%, respectivamente en los experimentos de 2006, 2007 y 2008 (considerando, en cada experimento, todos los riegos excepto el primero, por tener un comportamiento muy diferente). Las eficiencias de aplicación conseguidas en los primeros riegos fueron todavía más bajas, 13.3, 20.6, y 13.5%, respectivamente. Estos valores son netamente inferiores a los que pueden obtenerse en riegos por surcos según la bibliografía actual (65 – 75%; Solomon et al., 2007) y clásica [40-50% en riegos por surcos en suelos arenosos con una adecuada nivelación, y hasta 65% en suelos de textura media (Keller, 1965); 57% según el ILRI (Doorenbos y Pruitt, 1976), 55 – 70% según el USDA-SCS (Kruse y Heermann, 1977); 85-90% según (Elliot y Walker, 1982)]. No obstante, si se considera la pequeña lámina neta utilizada en estos experimentos, 22 mm, las eficiencias conseguidas son acordes con los datos presentados en la bibliografía; en efecto Keller (1965) presentó en una gráfica la relación lineal entre las eficiencias obtenidas en diferentes métodos de riego y la lámina de agua almacenada en el suelo, y concretamente en el riego por surcos en pendiente, para una lámina almacenada de 25 mm presentaba una eficiencia de aplicación del orden del 10%, es decir algo inferior a la obtenida en los primeros riegos de nuestros experimentos, y muy inferior a las obtenidas en los restantes riegos.

En cuanto a la uniformidad de distribución, se obtuvo una gran uniformidad en los resultados medios de cada experimento (excluidos el primer riego de cada experimento), 0.62 en 2006, 0.54 en 2007, y 0.61 en 2008. Los valores obtenidos en los primeros riegos de cada experimento fueron todavía más elevados, 0.93, 0.74, y 0.81, lo que es lógico, dadas los elevados aportes, 169, 114, y 164 mm.

La optimización del caudal de entrada y del tiempo de aplicación realizada con el programa WinSRFR 3.1, considera como combinación óptima la que maximiza tanto la eficiencia de aplicación como la uniformidad de distribución. Los valores medios de las eficiencias de aplicación obtenidas (exceptuando el primer riego) fueron de 83.9, 78.4, y 81.0% correspondientes respectivamente a los experimentos de 2006, 2007, y 2008. No obstante, más interesante que conocer los valores de los parámetros concretos para cada riego (porque cada evento del riego es irreplicable), es conocer las tendencias y las relaciones entre los parámetros. Por ello se ha obtenido una ecuación que relaciona el tiempo de aplicación (min) con el caudal unitario ( $L \cdot s^{-1}$ ):

$$T_a = 19.844 \cdot Q_u^{-0.9074} \quad (R^2 = 0.8807; p \leq 0.01)$$

Esta ecuación permitiría elegir el tiempo de aplicación en función del caudal de entrada disponible en cada caso, de manera, que en promedio, se maximizaría la eficiencia de aplicación y la uniformidad de distribución. Esta expresión fue validada durante la campaña de 2011, obteniéndose valores de la eficiencia de aplicación entre 65.8 y 75.5%

### 3.2- Respuesta del cultivo a las estrategias de plantación

Se han obtenido unas diferencias muy importantes entre los valores medios de los volúmenes de agua de riego correspondientes a C (1108 mm), m (831 mm) y M (554 mm), dado que los tres tipos de plantación se regaban simultáneamente, utilizando los mismos caudales y tiempos, siendo el número de surcos por unidad de área en M (m) la mitad (el

75%) que en C, por lo que el volumen de agua aportado en el riego fue la mitad (el 75%) en M (m) que en C.

La cosechadora funcionó muy bien en las mesetas M, porque la anchura de estas mesetas (120 cm) estaba adaptada a las dimensiones del cabezal de la cosechadora, pero su funcionamiento en las mesetas m mejoraría estrechando el cabezal a la misma anchura de la meseta (80 cm entre ejes), o mejor todavía aumentando esta anchura a 160 cm, lo que permitiría cosechar dos mesetas por pasada, reduciendo a la mitad el número de pases de la cosechadora. También podría resultar interesante reducir la anchura de la meseta a unos 70 cm y aumentar la anchura del cabezal de la cosechadora a 140 cm.

El rendimiento fue afectado ( $p \leq 0.01$ ) por el año de experimentación, por el tipo de plantación, y por su interacción (tabla 2). El rendimiento obtenido en 2007 ( $2.20 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ) fue muy inferior a los obtenidos en 2006 ( $2.81 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ) y en 2008 ( $2.78 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ). El menor rendimiento obtenido en el experimento de 2007 puede estar relacionado con el retraso de la plantación; en este sentido Pascual et al. (2000) aconsejaron adelantar las plantaciones, porque el rendimiento se incrementa al ampliar el ciclo de cultivo adelantando la plantación. Concretamente, la plantación de 2007 se realizó con 27 y 29 días de retraso con respecto a 2006 y 2008.

**Tabla 2. Efecto del año de experimentación y del tipo de plantación [caballones (C), mesetas de dos (m) y de tres (M) líneas de plantación] en el rendimiento, el peso unitario de los tubérculos y la eficiencia en el uso del agua de riego (EUAR).**

	Rendimiento ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )		Peso unitario (g)		EUAR ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	
Año de experimentación (AE)						
2006	2.81	a	0.62	3.73	a	
2007	2.20	b	0.61	3.09	c	
2008	2.78	a	0.64	3.33	b	
Tipo de plantación (TP)						
C	2.47	b	0.61	2.23	c	
m	2.80	a	0.64	3.38	b	
M	2.52	b	0.62	4.55	a	
ANOVA						
			Porcentaje de la suma de cuadrados			
Parámetros (g.l.)						
AE (2)	65.4	**	11.5	ns	6.9	**
TP (2)	18.1	**	8.3	ns	89.9	**
AExTP(4)	10.2	**	7.3	ns	1.6	*
Residual (18)	6.4		72.9		1.6	
Desviación estándar	0.11		0.04		0.15	

Letras distintas en una misma columna indican diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) según el test LSD; ns: no significativa; \*: Nivel de significación  $p \leq 0.05$ ; \*\*: Nivel de significación  $p \leq 0.01$

En cuanto al tipo de plantación el rendimiento medio obtenido en m ( $2.80 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ) fue muy elevado en relación con los obtenidos en C ( $2.47 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ) y en M ( $2.52 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ). El rendimiento medio obtenido en C fue similar al máximo absoluto obtenido por los agricultores ( $2.40 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ), por tanto el rendimiento obtenido en m puede ser considerado como muy elevado (13.4% mayor que en C). En cuanto a la interacción, el rendimiento obtenido en m fue mayor que el obtenido en C en los tres experimentos, mientras que únicamente en 2006 fue mayor que el obtenido en M; el rendimiento obtenido en M fue mayor que el obtenido en C únicamente en 2007.

De acuerdo con Caliskan et al. (2009), para maximizar el rendimiento de tubérculos es muy importante optimizar la densidad de plantación, porque un valor excesivo de la misma provoca una competencia entre las plantas por los factores de la producción, como la radiación solar, agua y nutrientes, mientras que una densidad de plantación demasiado baja

provoca un bajo aprovechamiento de los mismos. En este estudio, el rendimiento se incrementó con la densidad de plantación, hasta un cierto nivel de la misma, al igual que ha sido citado en otras plantas cultivadas por sus tubérculos, bulbos y raíces, como patata (Caliskan et al., 2009), cebolla (Brewster y Salter, 1980) y zanahoria (McCollum et al., 1986). En el presente estudio la densidad de plantación está directamente relacionada con el tipo de plantación, mesetas o caballones, pero en varios estudios donde se han analizado por separado ambos factores, se concluye que aunque el efecto del tipo de plantación no resulta tan evidente como el de la densidad de plantación, la realización de mesetas parece prometedora en determinadas situaciones (Essah y Honeycutt, 2004), si se dispone de maquinaria adecuada (Mundy et al., 1999). No se han detectado diferencias en cuanto al peso unitario entre tipos de plantación ni entre años de experimentación. Los valores de peso unitario de los tubérculos (0.61-0.64 g) son similares a los obtenidos en resultados ya presentados en el primer estudio.

La EUAR fue afectada ( $p \leq 0.01$ ) por el año de experimentación, el tipo de plantación y por su interacción. En 2006 se obtuvo mayor EUAR ( $3.73 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) que en 2007 ( $3.09 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) y 2008 ( $3.33 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ), consecuencia del mayor rendimiento obtenido respecto a 2007 y al menor riego respecto al 2008; al analizar la interacción se observa que estas diferencias fueron significativas únicamente en C y en m. En cuanto al tipo de plantación, existieron diferencias ( $p \leq 0.01$ ) entre los valores de EUAR de los tres tipos de plantación, M, m y C ( $4.55$ ,  $3.38$ , y  $2.23 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , respectivamente), en las tres campañas de experimentación, debido a las grandes diferencias entre los riegos aportados en los tres tipos de plantación. Tal y como se ha indicado anteriormente, la EUAR tiende a disminuir con el incremento del riego, de acuerdo con los resultados obtenidos en el cultivo de la patata por Yuan et al. (2003) y por Shahnazari et al. (2007); probablemente una considerable proporción del volumen de agua aportado en el riego no es consumida por la evapotranspiración, y según reportaron Tolk y Howell (2003), cuando se aportan grandes volúmenes, únicamente una pequeña fracción del agua aportada es aprovechada en el incremento del rendimiento. Los valores de la EUAR obtenidos en C ( $2.23 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) son superiores a los obtenidos en el estudio realizado paralelamente en riego por surcos, debido a los mayores rendimientos obtenidos en el presente estudio.

Respecto a las diferentes líneas de plantación de las mesetas, no existieron diferencias en ninguno de los parámetros analizados (datos no mostrados). Contrariamente a la creencia generalizada, en la línea central no se obtuvo un menor rendimiento, ni tubérculos más pequeños en relación a las otras dos líneas de plantación. Estos resultados coinciden con lo obtenido en el cultivo de la patata por Mundy et al. (1999) y de la zanahoria por White (1994), en el sentido de que la posición de la línea de plantación no afectó a su rendimiento.

#### **4- Conclusiones y recomendaciones**

Dentro del rango ensayado, con las estrategias que suponen el mantenimiento de un mayor contenido volumétrico del agua en el suelo se ha incrementado el rendimiento (del orden del 13%) y el peso unitario de los tubérculos (del orden del 3%), sin afectar a la eficiencia en el uso del agua de riego.

La eficiencia de aplicación obtenida con el manejo habitual de los agricultores está en torno al 30%. Se ha obtenido una relación de los valores optimizados de caudal unitario y tiempo de aplicación, con la aplicación de la cual se ha obtenido elevados valores teóricos de la eficiencia de aplicación, en torno al 70%, que han sido confirmados en la práctica.

Con respecto a la utilización de mesetas de dos y tres líneas de plantación se han obtenido mayores valores del rendimiento (hasta del 13% en el caso de las mesetas de dos líneas) y de la eficiencia en el uso del agua de riego (hasta del 104% en las mesetas de tres líneas), debido esto último especialmente al ahorro en la lámina de agua de riego aportada.

## 5- Bibliografía

- ALARC (Arid Land Agricultural Research Center) (2009). WinSRFR 3.1 User Manual. U.S. Department of Agriculture - Agricultural Research Service – ALARC. Maricopa, Arizona, USA.
- Autodesk. 2010. AutoCAD Map 3D (2010). User's guide. Autodesk Inc., San Rafael, California, USA.
- Boundarant, J.A. (1957). Developing furrow infiltrometer. *Agricultural Engineering*, 38,602-604.
- Brewster, J.L. & Salter, P.J. (1980). The effect of plant spacing on the yield and bolting of two cultivars of overwintered bulb onions. *Journal of Horticultural Science*, 55,97-102.
- Caliskan, M.E., Kusman, N. & Caliskan S. (2009). Effects of plant density and yield components of true potato seed (TPS) hybrids in early and main crop potato production systems. *Field Crops Research*, 114,223-232.
- Doorenbos, J. & Pruitt, W.O. (1976). Las necesidades de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje 24. FAO, Roma, Italia.
- Elías, F. & Ruiz, L. (1977). Agroclimatología de España. Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias. Ministerio de Agricultura, Madrid.
- Elliot, R.L. & Walker, W.R. (1982). Field evaluation of furrow infiltration and advance functions. *Transactions of the ASAE (American Society of Agricultural Engineers)*, 25,396-400.
- Essah, S.Y.C. & Honeycutt, C.W. (2004). Tillage and seed-sprouting strategies to improve potato yield and quality in short season climates. *American Journal of Potato Research*, 81,177-186.
- Fereres, E. (2008). The future of irrigation in horticulture. *Chronica Horticulturae*, 48,9-11.
- Keller, J. (1965). Effect of irrigation method on water conservation. *Journal of the Irrigation and Drainage*, 91,61-72.
- Kruse, E.G. & Heermann, D.F. (1977). Implications of irrigation system efficiencies. *Journal of Soil and Water Conservation*, 32,465-470.
- McCollun, T.G., Locascio, S.J. & White, J.M. (1986). Plant density and row arrangement effect on carrot yields. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 111,648-651.
- Mundy, C., Greamer, N., Crozier, C.R. & Wilson, L.G. (1999). Potato production on wide beds: impact on yield and selected soil physical characteristics. *American Journal of Potato Research*, 76,323-330.
- Pascual, B., Maroto, J.V., López-Galarza, S., Alagarda, J. & Castell Zeising V. (1997). El cultivo de la chufa. Estudios realizados. Generalitat Valenciana, Conselleria de Agricultura, Pesca y Alimentación, Valencia.
- Pascual, B., Maroto, J.V., López-Galarza, S., San Bautista, A. & Alagarda, J. (2000). Chufa (*Cyperus esculentus* L. var. *sativus* Boeck.): an unconventional crop. Studies related to applications and cultivation. *Economic Botany*, 54,439-448.
- Pascual-Seva, N., San Bautista, A., López-Galarza, S., Maroto, J.V. & Pascual, B. (2015). Response of nutsedge (*Cyperus esculentus* L. var *sativus* Boeck.) tuber production to drip irrigation based on volumetric soil water content. *Irrigation Science*, 33, 31-42.
- Shahnazari, A., Liu, F. Andersen, M.N., Jacobsen, S.E. & Jensen, C.R. (2007). Effects of partial root-zone drying on yield, tuber size and water use efficiency in potato under field conditions. *Field Crops Research*, 100,117-124.
- Shock, C.C., Feibert, E.B.G. & Saunders, L.D. (1998). Potato yield and quality response to deficit irrigation. *HortScience*, 33,655-659.
- Solomon, K.H., El-Gindy, A.M. & Ibatullin, S.R. (2007). Planning and system selection, p. 57-75. In: Hoffman, G.J., Evans, R.G., Jensen, M.E., Martin, D.L. Elliot, R.L. (eds.). Design and operation of Farm irrigation systems. American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, Michigan, USA.
- Statistical Graphics Corporation. (2005). Statgraphics Plus for Windows 5.1. Statistical Graphics, Rockville, Maryland, USA.





- Thompson, R.B., Gallardo, M., Agüera, Valdez, L.C. & Fernández, M.D. (2006). Evaluation of the watermark sensor for use with drip irrigated vegetable crops. *Irrigation Science*, 24,185-202.
- Tolk, J.A. & Howell, T. (2003). Water use efficiencies of grain sorghum grow in three USA southern Great Plains soils. *Agricultural Water Management*, 59, 97-111.
- Walker, W.R. & Skogerboe, G.V. (1987). *Surface irrigation. Theory and practice*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- Yuan, B.Z., Nishiyama, S. & Kang, Y. (2003). Effects of different irrigation regimes on the growth and yield of drip-irrigated potato. *Agricultural Water Management*, 63,153-167.



# DISTRIBUCIÓN DE AGUA DE RIEGO LIMITADA MEDIANTE ESTRATEGIAS DE RIEGO DEFICITARIO CONTROLADO OPTIMIZADO Y AÑO METEOROLÓGICO TÍPICO EN CEBOLLA

*Leite, K.N.<sup>1</sup>, Pardo, J.J.<sup>2</sup>, Martínez-Romero, A.<sup>3</sup>, Tarjuelo, J.M.<sup>4</sup>, Domínguez, A.<sup>5</sup>*

<sup>1</sup> Coordenação de Aperfeiçoamento de pessoal do nível superior (CAPES), Quadra 2, Bloco L, Lote 06, 70040-020, Brasília, DF, Brazil; [kellyleyte14@hotmail.es](mailto:kellyleyte14@hotmail.es)

<sup>2</sup> Ingeniero Agrónomo, Investigador; Centro Regional de Estudios del Agua (CREA), UCLM, Ctra. de Las Peñas km. 3.2, 02071 Albacete; [josejesus.pardo@uclm.es](mailto:josejesus.pardo@uclm.es)

<sup>3</sup> Dr. Ingeniero Agrónomo, Profesor Asociado; EIIAB, Departamento de Mecánica Aplicada e Ingeniería de Proyectos, UCLM; [angel.mromero@uclm.es](mailto:angel.mromero@uclm.es)

<sup>3</sup> Dr. Ingeniero Agrónomo, Catedrático de Universidad; Departamento de Producción Vegetal y Tecnología Agraria, UCLM; [jose.tarjuelo@uclm.es](mailto:jose.tarjuelo@uclm.es)

<sup>5</sup> Dr. Ingeniero Agrónomo, Profesor Contratado Doctor; Departamento de Producción Vegetal y Tecnología Agraria, UCLM; [alfonso.dominguez@uclm.es](mailto:alfonso.dominguez@uclm.es)

## Resumen

Bajo condiciones de limitación estricta del volumen de agua de riego, se debe evitar un agotamiento de éste en una etapa del desarrollo del cultivo temprana, ya que puede acarrear una disminución considerable en el rendimiento.

El objetivo de este trabajo ha sido desarrollar una metodología capaz de maximizar el rendimiento de un cultivo de cebolla cuando la cantidad de agua de riego disponible es inferior a las necesidades netas del cultivo para un año típico ( $I_n = 743.3$  mm). Para la validación de esta metodología se han considerado tres volúmenes de agua disponible ( $0,9 I_n$ ,  $0,8 I_n$ , y  $0,7 I_n$ ), simulando las estrategias de riego deficitario con el modelo MOPECO para la serie climática 2005-2012. La metodología propuesta combina dos metodologías existentes, el año meteorológico típico (TMY) y el riego deficitario optimizado por etapas (ORDI). Las simulaciones pusieron de manifiesto que la metodología logró una buena distribución dl agua disponible a lo largo de la campaña, a pesar de desconocer las condiciones climáticas en las que iba a desarrollar el cultivo. Los rendimientos obtenidos fueron alrededor de un 5.1% menores a los estimados al inicio de la campaña. Sólo 3 de los 24 escenarios analizados alcanzaron un déficit excesivo durante la última etapa, al agotar el agua antes de tiempo, por lo que la metodología puede utilizarse para distribuir volúmenes limitados de agua en un cultivo de cebolla del modo más eficiente.

## 1- Introducción y Objetivos

En zonas con escasez de agua, como es el caso de la unidad hidrogeológica “Mancha Oriental”, las autoridades que gestionan y regulan los aprovechamientos hídricos limitan la cantidad de agua de riego que pueden usar los agricultores. Por tanto, se corre el riesgo de que en años secos se gaste prematuramente dicha cantidad de agua, provocando una caída significativa del rendimiento del cultivo y, en consecuencia, de la rentabilidad final. Si la disponibilidad de agua es además inferior a las necesidades netas del cultivo, el riesgo es todavía mayor.

Una adecuada distribución de esa cantidad de agua es esencial para minimizar o evitar el riesgo antes mencionado. Para ello se requiere una metodología que permita estimar las condiciones climáticas que van a afectar al cultivo durante la campaña de riegos y que oriente sobre la estrategia de riegos más conveniente.

Si se dispone de un volumen limitado de agua de riego pueden plantear tres escenarios: 1) las necesidades de agua de un cultivo son similares a las de un año medio, y por tanto, se usará toda el agua disponible sin que haya estrés por déficit hídrico en el cultivo (año típico caracterizado como Intermedio); las necesidades de agua son mayores que la cantidad de agua disponible, pudiendo agotar el agua prematuramente, que conllevaría pérdidas considerables de rendimiento (condiciones climáticas caracterizadas como un año típico Seco); 3) las necesidades del cultivo son inferiores al volumen disponible y sobra agua (año típico caracterizado como húmedo).

El objetivo de este trabajo ha sido desarrollar una metodología capaz de maximizar el rendimiento de un cultivo de cebolla cuando la cantidad de agua de riego disponible es inferior a las necesidades netas del cultivo para un año típico ( $I_n = 743.3$  mm). Para la validación de esta metodología se han considerado tres volúmenes de agua disponible ( $0.9 I_n$ ,  $0.8 I_n$ , y  $0.7 I_n$ ), simulando las estrategias de riego deficitario con el modelo MOPECO (Ortega et al., 2004). La metodología propuesta combina dos metodologías existentes, el año meteorológico típico (TMY) (Domínguez et al., 2013) y el riego deficitario optimizado por etapas (ORDI) (Domínguez et al., 2012a).

## 2- Materiales y métodos

Utilizando los datos diarios de la estación climática “Los Llanos” (Albacete) para la serie 1951-2004, se han determinado tres tipos de TMY (seco, intermedio y húmedo) (Domínguez et al., 2013) en función del índice de déficit de precipitación (PD) mediante estas tres ecuaciones (Ec 1) (Leite et al., 2015):

$$PD = P - ET_o \quad Z = \frac{PD - PD_{medio}}{DS} \quad R = \frac{máximoZ - mínimoZ}{n^o \text{ de grupos}} \quad (1)$$

Siendo DS la desviación estándar y quedando divididos los 3 grupos de la siguiente manera:

Años secos:  $mínimoZ \leq Z \leq mínimoZ + R$ .

Años intermedios:  $mínimoZ + R \leq Z \leq máximoZ - R$ .

Años húmedos:  $máximoZ - R \leq Z \leq máximoZ$ .

A partir de los datos climáticos del TMY intermedio se determinó la cantidad de agua de riego neta para cubrir las necesidades del cultivo ( $I_n = 743.3$  mm), y se obtuvieron los volúmenes netos disponibles para tres escenarios ( $0.9 I_n$ ,  $0.8 I_n$ , y  $0.7 I_n$ ).

Para establecer la programación de riegos optimizada, se estimó la relación  $ET_a/ET_m$  para cada etapa de desarrollo fenológico del cultivo que maximizaba el rendimiento dada una relación  $ET_a/ET_m$  global (Domínguez et al., 2012a). Para ello es necesario conocer: la disponibilidad de agua de riego, el rendimiento potencial de la cebolla en la zona ( $Y_m$ ), la evapotranspiración potencial ( $ET_m$ ) acumulada teórica en cada una de las 4 etapas de diferente sensibilidad al déficit ( $K_y$ ) consideradas (establecimiento (i'), desarrollo vegetativo (i''), bulberización (ii), y maduración (iii)), los valores de  $K_y$  de cada etapa, y la precipitación efectiva de cada etapa de  $K_y$  ( $Pe$ ) (Stewart et al., 1977).

$$Y_a = Y_m \prod_{k=1}^{n-4} \left( 1 - k_{y_k} \left( 1 - \frac{ET_{a_k}}{ET_{m_k}} \right) \right) \quad (2)$$

La ecuación y los coeficientes de estrés en cebolla fueron validados por Domínguez et al. (2012b) en Motilleja (Albacete) para relaciones  $ET_a/ET_m$  de entre 1 y 0.4.

Para evitar resultados agronómicamente inaceptables y una posible sobreestimación del rendimiento, se introdujeron algunas restricciones en el optimizador, tales como limitar a 0.5 el mínimo valor que puede alcanzar la relación  $ET_a/ET_m$  objetivo en cada etapa (Doorenbos

y Kassam, 1979), limitar a 0.8 el máximo estrés durante la etapa de establecimiento para garantizar una adecuada nascencia, debiendo determinar la máxima diferencia de  $ETa/ETm$  entre etapas de desarrollo consecutivas (Dominguez et al., 2012b).

La metodología seguida para determinar la cantidad de agua de riego a aplicar en cada una de las etapas de desarrollo de la cebolla puede resumirse en tres pasos:

1. 1ª Optimización: En base a los datos climáticos de los meses previos a la siembra (desde el 1 de septiembre), se caracteriza el año en curso como seco, intermedio o húmedo. Los datos climáticos correspondientes al TMY de similar categoría al año actual son utilizados por la metodología ORDI para establecer las relaciones  $ETa/ETm$  objetivo para cada etapa  $Ky$  del ciclo en función de la disponibilidad de agua de riego, las necesidades de riego teóricas en cada etapa, y el rendimiento esperado para esas condiciones.
2. 2ª Optimización: Lograr la relación  $ETa/ETm$  objetivo determinada para la primera etapa en la primera optimización utilizando los datos climáticos reales del año en curso, probablemente implicará haber utilizado una cantidad de agua de riego diferente a la prevista en la 1ª optimización. También serán diferentes la  $ETm$  y la precipitación efectiva ( $Pe$ ) acumuladas. En consecuencia, es necesario realizar una nueva optimización que determine las relaciones  $ETa/ETm$  objetivo para el resto de etapas teniendo en cuenta la nueva disponibilidad de agua de riego y la relación  $ETa/ETm$  realmente obtenida en la primera etapa. Además, se analiza si el año continúa siendo seco, húmedo o intermedio. En esta 2ª Optimización se reserva cierta cantidad de agua para la última etapa (relación  $ETa/ETm$  de la cuarta etapa en la primera optimización multiplicada por la  $ETm$  esperada de esa etapa).
3. 3ª y 4ª Optimización: Se repite el paso 2 para las etapas de  $Ky$  3 y 4.

### 3- Resultados y Discusión.

Con los datos climáticos de los años 2005 a 2012 se calculó la distribución óptima del agua de riego disponible para cada etapa de desarrollo fenológico para 3 dotaciones de agua (0.9 In, 0.8 In, y 0.7 In, siendo In las necesidades netas de riego para el “Año intermedio”). Siguiendo la metodología propuesta, al inicio del proceso de optimización se determinó el tipo de TMY, y así sucesivamente para cada etapa de desarrollo fenológico (Tabla 1).

**Tabla 1.** Evolución del tipo de año durante la campaña de riegos y relación  $PD_{TMY}/PD_{actual}$ .

Optimization	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
1st	Dry 0.82	Inter. 0.87	Inter. 0.89	Dry 0.87	Wet 0.98	Inter. 1.09	Wet. 0.90	Dry 1.16
2nd	Dry 0.83	Inter. 1.15	Inter. 1.17	Dry 1.03	Wet 0.86	Inter. 1.07	Wet 0.92	Dry 0.95
3rd	Dry 0.79	Inter. 1.11	Inter. 1.06	Inter. 1.20	Inter. 1.03	Inter. 1.09	Wet 0.93	Dry 0.93
4th	Dry 0.83	Inter. 1.05	Inter. 0.98	Dry 1.04	Dry 1.00	Inter. 0.99	Inter 1.03	Dry 0.92
End	Dry 0.85	Inter. 1.03	Inter. 0.96	Dry 1.01	Dry 1.05	Inter. 1.04	Inter 1.12	Dry 0.95

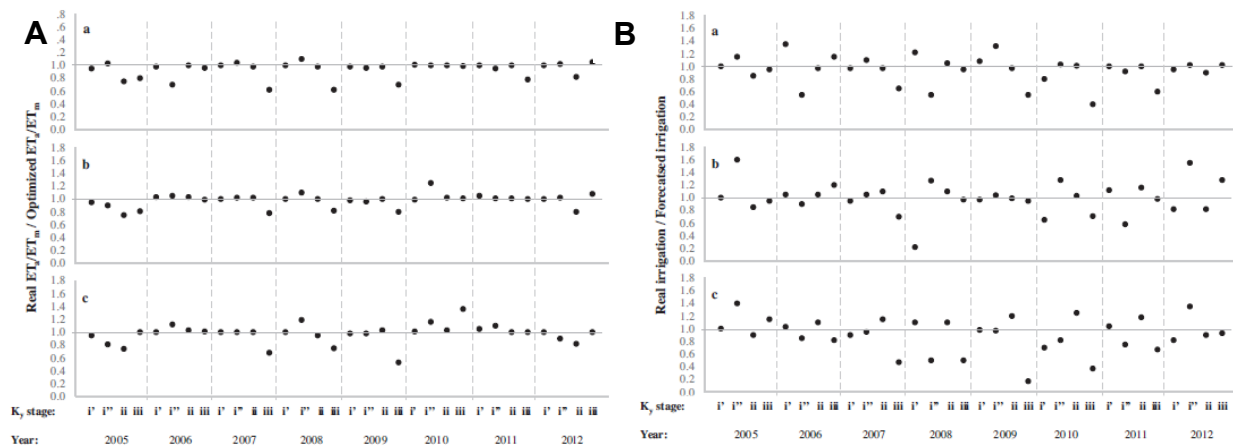
Donde: Dry, seco; Inter., intermedio; Wet, húmedo.

La mayoría de los años mantuvieron la misma calificación durante toda la campaña. Sin embargo, los años 2009 y 2011 evolucionaron a situaciones más desfavorables, pasando de un año considerado húmedo a seco e intermedio, respectivamente. Lo ocurrido en 2009 es el peor escenario posible. El modelo asume que dispondrá de una mayor disponibilidad de agua de lluvia, pudiendo aportar más agua de riego en las etapas iniciales, precisamente en las que el ahorro de agua de riego tiene un menor efecto en el rendimiento final. Esto se tradujo en una falta de agua durante la etapa de maduración, en parte amortiguada por la reserva de agua de la segunda optimización. La relación  $PD_{TMY}/PD_{actual}$  se utilizó para determinar como de seco, intermedio o húmedo era el año actual. Como ejemplo, 2005 fue más seco que el TMY-seco y 2011 fue el más húmedo, pero ligeramente más seco que un

TMY-húmedo. Gracias a las sucesivas optimizaciones al finalizar cada etapa de desarrollo, así como reservar una cierta cantidad de agua para la última etapa, los efectos de la variabilidad climática son minimizados.

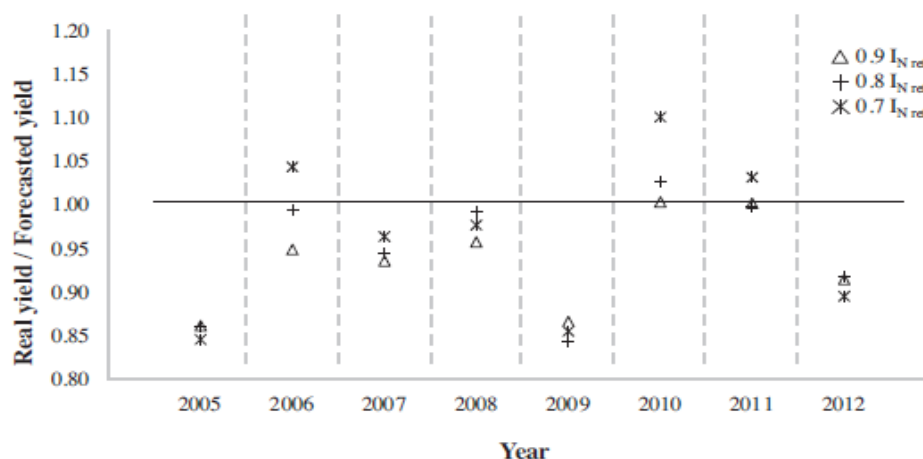
En la mayoría de los casos el modelo consiguió alcanzar la relación  $ET_a/ET_m$  objetivo en cada una de las etapas (Fig. 1A). Sin embargo, en los años más secos y con menor disponibilidad de agua puede apreciarse como la última etapa es la que se queda por debajo del objetivo (años 2007 y 2009). En algunas etapas, donde la lluvia fue superior a la esperada, incluso se obtuvieron relaciones  $ET_a/ET_m$  superiores a la objetivo (2008 y 2010).

Para lograr las relaciones  $ET_a/ET_m$  objetivo el modelo tuvo que aplicar dosis de riego que en ocasiones fueron muy diferentes a las esperadas en cada etapa (Fig. 1B). Esto fue debido principalmente a la irregular distribución de la lluvia (que no coincide con la del año típico utilizado) y en menor medida a las variaciones diarias de  $ET_o$ .



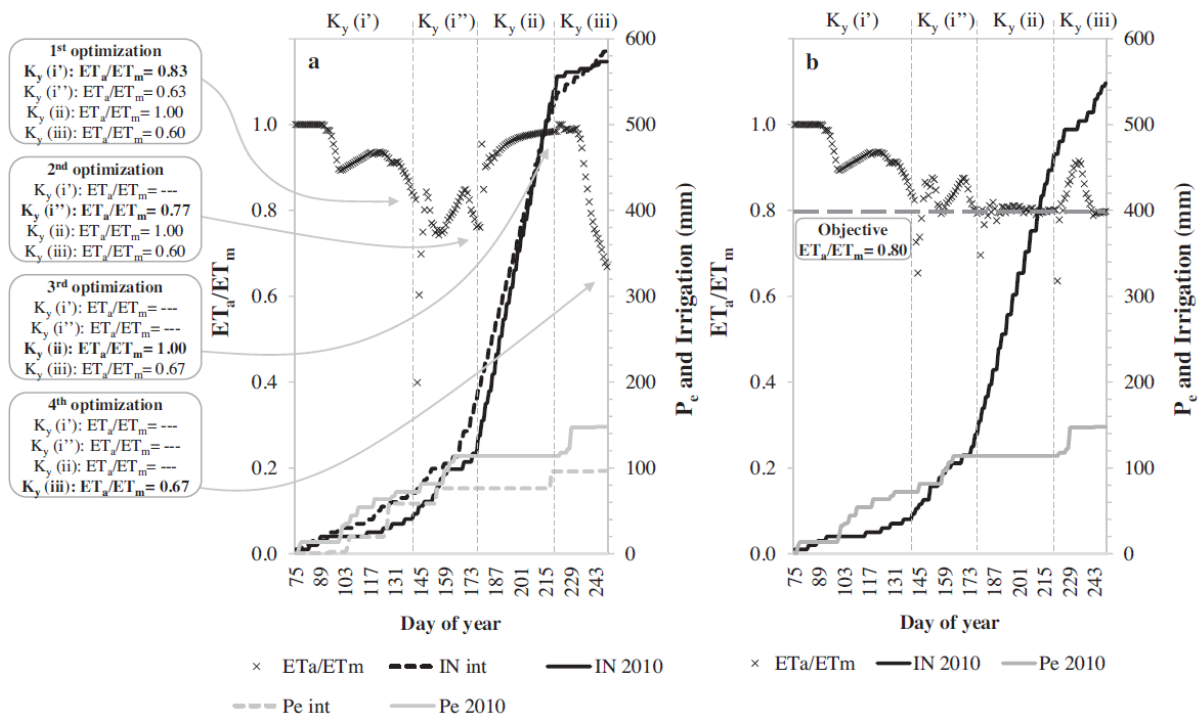
**Figura 1.** A) Relación entre la relación  $ET_a/ET_m$  real y la objetivo para los tres niveles de agua total disponible (0.9 In, 0.8 In y 0.7 In); 1B) Relación entre el riego real y el previsto para tres niveles de agua total disponible (a: 0.9 In, b: 0.8 In, c: 0.7 In, siendo In: 743.3 mm).

Los rendimientos esperados al inicio de la campaña (primera optimización) se compararon con el rendimiento final obtenido (Fig. 2). La mayoría de los rendimientos estimados al finalizar el año han variado un  $\pm 5\%$  con respecto a los previstos al inicio de la campaña, aunque en los escenarios más desfavorables (2005, 2009 y 2012) han sido hasta un 10-15% inferiores (Fig. 2). Sólo 3 de los 24 escenarios analizados alcanzaron un déficit excesivo durante la última etapa, al agotar el agua antes de tiempo, por lo que la metodología puede utilizarse para distribuir volúmenes limitados de agua en un cultivo de cebolla del modo más eficiente. Pese a todo, la metodología propuesta puede ser adecuada para asesorar a los regantes sobre la manera de mejorar la distribución del agua de riego durante el periodo de crecimiento bajo condiciones de déficit moderado (0.9 y 0.8 In).



**Figura 2.** Relación entre el rendimiento real y el previsto para los tres niveles de agua total disponible (0.9 In, 0.8 In y 0.7 In).

Se comparó en MOPECO la metodología propuesta con un riego deficitario en el que el nivel de déficit se mantuvo constante en todas las etapas (CDI). La cantidad de agua disponible fue 0.8 In para el caso de ORDI, y la relación objetivo  $ET_a/ET_m=0.8$  para el CDI. El año elegido fue 2010 (intermedio) (Fig.3).



**Figura 3.** Comparación de la distribución del agua de riego entre el optimizado (a) y el CDI (b) para el año 2010 y 0.8 In de volumen de agua disponible;  $K_y$ : etapa de desarrollo;  $ET_a/ET_m$ : relación entre la evapotranspiración real y máxima acumulada en cada etapa;  $Pe$ : lluvia efectiva acumulada en condiciones de TMY-intermedio ( $Pe_{int}$ ), y en condiciones reales del año 2010 ( $Pe_{2010}$ );  $IN$ : progresión neta de riego acumulado [prevista para las condiciones meteorológicas de TMY-intermedio ( $IN_{int}$ ), y simulado por MOPECO para el año 2010 ( $IN_{2010}$ )].

Como se aprecia en la figura 3, debido a las lluvias de la última etapa, el agua empleada en el CDI fue un 4.5% menor que en el ORDI (548.5 frente a 573.4 mm). Sin embargo, el rendimiento simulado obtenido por el CDI fue un 13.2% menor al ORDI (73542 kg ha<sup>-1</sup> frente a 83510 kg ha<sup>-1</sup>). Estas diferencias implican una diferencia de margen bruto de 627.4 € ha<sup>-1</sup> a favor del ORDI.

### 3- Conclusiones y recomendaciones

La metodología propuesta en este estudio, que combina las técnicas ORDI y TMY, permite a los agricultores reducir al mínimo las pérdidas de rendimiento en el cultivo de cebolla (alrededor de 5.1% respecto al rendimiento teórico esperado al inicio de la campaña para el volumen de agua de riego disponible) mediante la optimización de la distribución del agua de riego durante todo el ciclo de cultivo. Además, se consigue un uso más eficiente del agua y un margen bruto mayor (13.2%) comparado con un riego deficitario constante por etapas.



Las sucesivas optimizaciones al finalizar cada etapa de desarrollo, así como reservar una cierta cantidad de agua para la última etapa, permiten minimizar los efectos de la variabilidad climática.

#### 4- Bibliografía.

**Domínguez, A., de Juan, J.A., Tarjuelo, J.M., Martínez, R.S., Martínez-Romero, A., 2012a.** Determination of optimal regulated deficit irrigation strategies for maize in a semi-arid environment. *Agric. Water Manage.* 110, 67–77.

**Domínguez, A., Jiménez, M., Tarjuelo, J.M., de Juan, J.A., Martínez-Romero, A., Leite, K.N., 2012b.** Simulation of onion crop behaviour under optimized regulated deficit irrigation using Mopeco model in a semi-arid environment. *Agric. Water Manage.* 113, 64–75.

**Domínguez, A., Martínez-Romero, A., Leite, K.N., Tarjuelo, J.M., de Juan, J.A., López-Urrea, R., 2013.** Combination of typical meteorological year with regulated deficit irrigation to improve the profitability of garlic in central Spain. *Agric. Water Manage.* 130, 154–167.

**Doorenbos, J., Kassam, A.H., 1979.** Yield response to water. In: *Irrigation and Drainage Paper No. 33.* FAO, Italy.

**Leite, K.N., Martínez-Romero, A., Tarjuelo J.M., Domínguez, A., 2015.** Distribution of limited irrigation water base don optimized regulated deficit irrigation and typical meteorological year concepts. *Agric. Water Manage.* 148, 164–176.

**Microsoft, 2010.** Microsoft Excel 2010. Product Guide. Microsoft Corp., USA.

**Ortega, J.F., de Juan, J.A., Martín-Benito, J.M., López-Mata, E., 2004.** MOPECO: an economic optimization model for irrigation water management. *Irrig. Sci.* 23 (2), 61–75.

**Stewart, J.I., Hagan, R.M., Pruitt, W.O., Kanks, R.J., Riley, J.P., Danilson, R.E., Franklin, W.T., Jackson, E.B., 1977.** Optimizing crop production through control of water and salinity levels. *Utah Water Res. Lab. PWRG 151-1,* Utah, USA.



# APLICACIÓN Y ANÁLISIS DE UN MODELO PARA LA PREDICCIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO (ET<sub>c</sub>) EN CEBOLLA Y MAÍZ EN CONDICIONES SEMIÁRIDAS

*Barroso Costa, F. R.<sup>1</sup> Ortega Álvarez, J. F.<sup>2</sup> Ballesteros González, R.<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> Ingeniero Agrónomo, Estudiante de doctorado, Centro Regional de Estudios del Agua (CREA), Universidad de Castilla-La Mancha, Ctra. de Las Peñas km. 3.4, 02071 Albacete, [fellyperodrigo.barrosocosta@alu.uclm.es](mailto:fellyperodrigo.barrosocosta@alu.uclm.es).

<sup>2</sup> Profesor Titular, Centro Regional de Estudios del Agua (CREA), Universidad de Castilla-La Mancha, Ctra. de Las Peñas km. 3.4, 02071 Albacete, [jose.ortega@uclm.es](mailto:jose.ortega@uclm.es).

<sup>3</sup> Personal Investigador, Centro Regional de Estudios del Agua (CREA), Universidad de Castilla-La Mancha, Ctra. de Las Peñas km. 3.4, 02071 Albacete, [rocio.ballesteros@uclm.es](mailto:rocio.ballesteros@uclm.es).

## Resumen

La mejora de la gestión de los recursos hídricos en la agricultura es un objetivo prioritario a nivel mundial. Los modelos de predicción de evapotranspiración del cultivo (ET<sub>c</sub>) integrados en el asesoramiento al regante ayudan en la mejora de la eficiencia de uso del agua. La predicción de datos climáticos es muy útil en la estimación de la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) en tiempo real para optimizar la programación del riego. Así, el objetivo de este trabajo es analizar los resultados sobre la ET<sub>o</sub> y ET<sub>c</sub>, para los cultivos de maíz y cebolla, a partir del uso de las predicciones ofrecidas por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y la estimación de la ET<sub>o</sub> mediante las Redes neuronales Artificiales (RNA) en dos ubicaciones semiáridas localizadas en La Mancha Oriental. En el cálculo de ET<sub>o</sub> a través de la fórmula de PM-56 fueron utilizados datos observados diarios de dos estaciones meteorológicas localizadas en La Mancha Oriental (Pozo Cañada y Tarazona de La Mancha) para los años de 2011 y 2012. También fue estimada la ET<sub>o</sub> a través de la metodología de RNAs, utilizando el software FORET<sub>o</sub> (Ballesteros, 2014) utilizando las variables climáticas predichas por la AEMET. A partir de los valores predichos de ET<sub>o</sub> fue posible obtener los valores de ET<sub>c</sub> en los 7 días siguientes. Estas predicciones fueron comparadas con los datos de ET<sub>c</sub> observados para el mismo periodo. Los resultados estadísticos indican que los valores predichos de ET<sub>c</sub>, de forma general, se ajustan adecuadamente a los valores observados en los 7 días de predicción. Los mejores valores de ajuste se observan durante los primeros días de predicción ( $R^2=0.95$ ). A pesar de haber una disminución en el ajuste en los últimos días de predicción ( $R^2=0.92$ ), el modelo se mantiene dentro del rango establecido para un buen ajuste. Así se concluye que las predicciones presentan un buen ajuste en relación a los datos observados en las estaciones, lo que demuestra que el modelo puede ser utilizado como una herramienta adicional de ayuda a los regantes, que podrán tener una predicción de 7 días con una gran fiabilidad de los datos.

## 1 – Introducción

La mejora de la gestión de los recursos hídricos en la agricultura es un objetivo prioritario a nivel mundial y especialmente en los territorios semiáridos de la cuenca mediterránea.

Una forma de mejorar la gestión de unos recursos hídricos escasos es aumentar la eficiencia de uso del agua, haciendo inversiones a nivel de conocimiento y capacidad humana (Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture, 2007), ya sea en las áreas urbanas o en el ámbito rural, ya que en las zonas semiáridas el consumo mayoritario del agua es en regadío, y en algunos casos ese consumo va por encima del 90% de los usos consuntivos totales (MARM, 2010), como es el caso de La Mancha Oriental. Los modelos de predicción de evapotranspiración del cultivo (ET<sub>c</sub>) ayudan en la mejora esta eficiencia, pero se hacen necesarios modelos que puedan predecir la ET<sub>c</sub> diaria en un periodo de tiempo suficientemente amplio para su utilización práctica por los regantes en la determinación de las necesidades hídricas de los cultivo.

La predicción de datos climáticos es muy útil para la estimación de la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) en tiempo real para optimizar la programación del riego. El servicio de predicción de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) (<http://www.aemet.es/es/el tiempo/prediccion>) proporciona pronósticos diarios de variables climáticas como la temperatura máxima (T<sub>MAX</sub>) y mínima (T<sub>MIN</sub>), humedad relativa (Hr) y velocidad del viento (W) en una base semanal utilizando las entradas generadas por el sistema de predicción por conjuntos del European Centre for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF) (<http://www.ecmwf.int/>). La AEMET también ofrece los registros de las variables climáticas observadas. Estas predicciones se basan en las perturbaciones atmosféricas sobre su estado inicial mediante la aplicación y modelos complejos para la predicción a medio plazo (3 a 7 días) (ECMWF, 2015). Para el cálculo de ET<sub>c</sub> se utiliza como referencia el valor de evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) obtenido a través de la fórmula propuesta por Penman-Monteith (PM-56) (Allen *et al.*, 1998). También se puede estimar mediante modelos basados en Redes Neuronales Artificiales (RNA), como una alternativa a los modelos más tradicionales en un contexto de limitación en la disponibilidad de datos meteorológicos (Ballesteros, 2014).

El objetivo de este trabajo es analizar los resultados sobre la ET<sub>o</sub> y ET<sub>c</sub>, para los cultivos de maíz y cebolla, del uso de modelos de predicción semanal basado en los pronósticos de la AEMET y en la estimación de la ET<sub>o</sub> mediante RNA en dos ubicaciones semiáridas localizadas en La Mancha Oriental.

## 2 – Material y métodos

En el cálculo de ET<sub>o</sub> a través de la fórmula de PM-56 fueron utilizados datos diarios de dos estaciones meteorológicas localizadas en La Mancha Oriental (Pozo Cañada y Tarazona de La Mancha). Los datos meteorológicos observados para los años de estudio (2011 y 2012), se obtuvieron a través del Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SIAR). Los datos diarios de predicción semanal para los mismos años de estudio se obtuvieron, diariamente, de la AEMET para la estimación de la ET<sub>o</sub> predicha a través de la metodología de RNAs, utilizando el software FORET<sub>o</sub>, que fue calibrado y validado con datos diarios predichos de T<sub>MAX</sub> y T<sub>MIN</sub> para las mismas estaciones meteorológicas (Ballesteros, 2014). Los datos predichos de ET<sub>o</sub> obtenidos a partir del FORET<sub>o</sub> fueron analizados y comparados con los obtenidos a partir de datos meteorológicos observados utilizando la fórmula PM-56 como método de referencia.

Para el cálculo de la ET<sub>c</sub> fue creado un modelo en MATLAB que, utilizando los datos de ET<sub>o</sub> calculados a través de las dos metodologías presentadas anteriormente y datos de coeficiente de cultivo (K<sub>c</sub>) para cada fase de desarrollo del cultivo (Allen *et al.*, 1998) (ECUACIÓN 1), permite calcular 7 días consecutivos de predicción de ET<sub>c</sub> para todo el ciclo del cultivo.

La duración de las etapas fenológicas para ambos cultivos se estableció mediante observaciones semanales realizadas en campo en las que se registraron aquellos cambios en el grado de cobertura verde y de altura de cultivo correspondientes a las cuatro etapas

propuestas por Allen *et al.* (1998) a las cuales se les asignó el Kc propuesto por la misma metodología para cada una de estas etapas.

De esta forma, los resultados obtenidos de ETc, en las dos metodologías, fueron sometidos a los siguientes tratamientos estadísticos: Coeficiente de determinación ajustado ( $R^2_{ajust.}$ ), desviación estándar ( $\sigma$ ), raíz del error cuadrático medio (RMSE), error relativo ( $\epsilon$ ) coeficiente de eficiencia del modelo de Nash-Suthcliff (E) e índice de agregación de Willmott (d). Estos tratamientos fueron hechos utilizando los programas Excel 2010 y Statgraphics Centurion. Se realizaron los análisis para las dos ubicaciones diferenciadas y representativas de La Mancha Oriental y los dos cultivos de trabajo (maíz y cebolla).

### 3 – Resultados y discusión

En las Tablas 1 y 2 están presentados los valores del análisis estadístico del modelo de predicción semanal en cada etapa del ciclo fenológico de la cebolla en las estaciones de Pozo Cañada y Tarazona en el año 2011.

**Tabla 1.** Análisis estadístico de ajuste del modelo de predicción semanal de ETc en la estación de Pozo Cañada por etapas del ciclo fenológico del cultivo de cebolla en el año 2011.

Día	Etapa 1			Etapa 2			Etapa 3			Etapa 4		
	$R^2_{ajust.}$	E	d	$R^2_{ajust.}$	E	d	$R^2_{ajust.}$	E	d	$R^2_{ajust.}$	E	d
MD	0.99	0.97	0.99	0.97	0.92	0.98	0.91	0.91	0.98	0.89	0.89	0.97
1	0.98	0.96	0.99	0.95	0.91	0.98	0.91	0.89	0.98	0.89	0.90	0.97
2	0.97	0.95	0.99	0.92	0.86	0.97	0.92	0.90	0.98	0.84	0.87	0.97
3	0.97	0.95	0.99	0.93	0.84	0.96	0.93	0.91	0.98	0.81	0.88	0.97
4	0.96	0.94	0.98	0.92	0.83	0.96	0.92	0.91	0.98	0.80	0.86	0.96
5	0.96	0.94	0.98	0.90	0.78	0.95	0.91	0.89	0.98	0.78	0.85	0.96
6	0.96	0.94	0.98	0.90	0.79	0.95	0.92	0.90	0.98	0.78	0.86	0.96

MD = Mismo día.

**Tabla 2.** Análisis estadístico de ajuste del modelo de predicción semanal de ETc en la estación de Tarazona por etapas del ciclo fenológico del cultivo de cebolla en el año 2011.

Día	Etapa 1			Etapa 2			Etapa 3			Etapa 4		
	$R^2_{ajust.}$	E	d	$R^2_{ajust.}$	E	d	$R^2_{ajust.}$	E	d	$R^2_{ajust.}$	E	d
MD	0.95	0.94	0.98	0.05	-0.78	0.56	0.86	0.86	0.96	0.70	0.67	0.87
1	0.95	0.94	0.98	0.06	-0.78	0.55	0.86	0.87	0.96	0.70	0.70	0.89
2	0.95	0.94	0.98	0.05	-0.90	0.54	0.87	0.87	0.96	0.71	0.71	0.90
3	0.95	0.94	0.98	0.05	-1.07	0.55	0.87	0.87	0.96	0.73	0.70	0.88
4	0.96	0.95	0.98	0.06	-1.18	0.55	0.90	0.91	0.98	0.87	0.80	0.92
5	0.95	0.95	0.98	0.06	-1.28	0.54	0.90	0.91	0.97	0.82	0.80	0.92
6	0.96	0.95	0.99	0.04	-1.17	0.53	0.90	0.91	0.98	0.80	0.81	0.93

MD = Mismo día.

Es posible observar que, en la estación de Pozo Cañada, el modelo se ajusta bien a todas las etapas de desarrollo del cultivo. En la estación de Tarazona, en la etapa 2, el modelo no presentó buen ajuste, lo que puede ser debido a un evento de lluvia que ocurrió en esta etapa. En el periodo llovió una cantidad acumulada de 39 mm, que fueron distribuidas en dos eventos de mayor cantidad (17.2 y 11.2 mm) y otras lluvias de pequeña intensidad. Pero, a pesar de una cantidad acumulada pequeña, el hecho de haber llovido en algunos días y la pequeña duración de la etapa hicieron con que el ajuste bajase considerablemente. En las otras etapas el modelo presentó valores de ajuste dentro del rango aceptable. Se nota también un comportamiento común a la mayoría de los resultados presentados anteriormente, que es lo de disminuir el ajuste a medida en que se van aumentando los días de predicción, o sea, la predicción para el mismo día, normalmente, tiene mejor ajuste do que las predicciones para los 7 siguientes.

En las Tablas 3 y 4 se puede observar los valores del análisis estadístico del modelo de predicción semanal en cada etapa del ciclo fenológico de la cebolla en las estaciones de Pozo Cañada y Tarazona en el año 2012.

**Tabla 3.** Análisis estadístico de ajuste del modelo de predicción semanal de ETc en la estación de Pozo Cañada por etapas del ciclo fenológico del cultivo de cebolla en el año 2012.

Día	Etapa 1			Etapa 2			Etapa 3			Etapa 4		
	R <sup>2</sup> <sub>ajust.</sub>	E	d	R <sup>2</sup> <sub>ajust.</sub>	E	d	R <sup>2</sup> <sub>ajust.</sub>	E	d	R <sup>2</sup> <sub>ajust.</sub>	E	d
MD	0.99	0.99	1.00	0.85	0.85	0.96	0.91	0.87	0.97	0.74	0.12	0.86
1	0.98	0.98	0.99	0.85	0.83	0.96	0.85	0.80	0.96	0.73	0.07	0.86
2	0.97	0.97	0.99	0.82	0.78	0.95	0.82	0.77	0.95	0.70	-0.06	0.85
3	0.96	0.96	0.99	0.77	0.74	0.94	0.83	0.78	0.95	0.71	-0.17	0.84
4	0.96	0.96	0.99	0.73	0.70	0.92	0.86	0.81	0.96	0.73	-0.15	0.85
5	0.96	0.96	0.99	0.72	0.68	0.92	0.89	0.84	0.97	0.74	-0.10	0.86
6	0.96	0.95	0.99	0.70	0.62	0.91	0.90	0.86	0.97	0.75	0.07	0.87

MD = Mismo día.

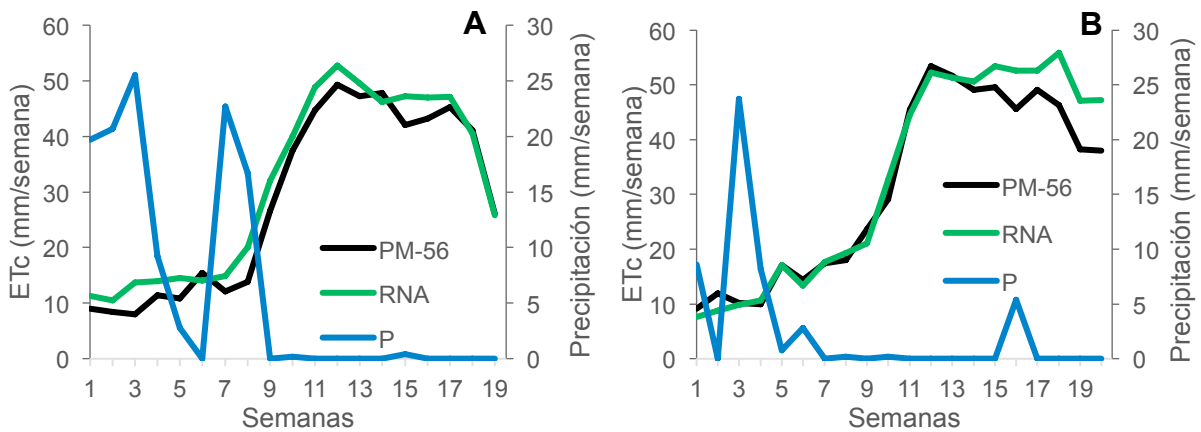
**Tabla 4.** Análisis estadístico de ajuste del modelo de predicción semanal de ETc en la estación de Tarazona por etapas del ciclo fenológico del cultivo de cebolla en el año 2012.

Día	Etapa 1			Etapa 2			Etapa 3			Etapa 4		
	R <sup>2</sup> <sub>ajust.</sub>	E	d	R <sup>2</sup> <sub>ajust.</sub>	E	d	R <sup>2</sup> <sub>ajust.</sub>	E	d	R <sup>2</sup> <sub>ajust.</sub>	E	d
MD	0.96	0.96	0.99	0.86	0.87	0.96	0.96	0.95	0.99	0.82	0.29	0.90
1	0.93	0.93	0.98	0.81	0.82	0.95	0.94	0.94	0.98	0.83	0.41	0.91
2	0.89	0.89	0.97	0.77	0.78	0.94	0.95	0.94	0.99	0.83	0.40	0.91
3	0.87	0.87	0.97	0.78	0.79	0.94	0.95	0.94	0.99	0.84	0.40	0.91
4	0.87	0.88	0.97	0.80	0.80	0.95	0.96	0.95	0.99	0.86	0.40	0.91
5	0.87	0.87	0.97	0.80	0.80	0.95	0.96	0.95	0.99	0.84	0.36	0.90
6	0.87	0.87	0.97	0.77	0.77	0.94	0.96	0.95	0.99	0.86	0.36	0.91

MD = Mismo día.

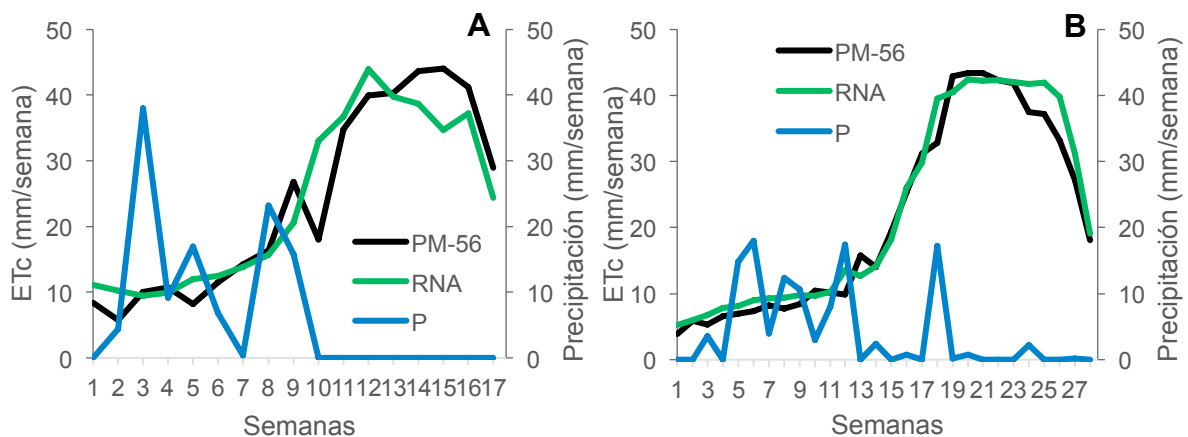
Se nota que el modelo no se ajusta bien en la última etapa de cultivo en la estación de Pozo Cañada, pero se muestra muy bien ajustado en las 3 etapas iniciales. Los valores presentados en la etapa 4 nos dicen que el modelo presenta valores de predicción, durante la etapa, parecidos con los de la media de las observaciones en el período (TABLA 3). Eso puede haber ocurrido por el hecho de que en la última etapa la cebolla baja su ETc muy rápidamente, en cuanto que en las predicciones esa disminución va un poco más despacio, ocasionando ese ligero desajuste en el modelo. Lo mismo ocurre en la estación de Tarazona (TABLA 4), siendo que en esta estación el ajuste se presenta un poco mejor que en Pozo Cañada.

En la Figura 1, Estación de Pozo Cañada, se puede ver la ETc acumulada estimada por predicciones semanales por las dos metodologías (PM-56 y RNA). Se nota que los valores predichos siguen la misma tendencia de los valores observados, o sea, cuando aumentan los valores de ETc estimados por PM-56, aumentan también los estimados por las RNA, aún que no en la misma cantidad. Se observa también que en el año 2012 el modelo se ajusta mejor que el año 2011 hasta un poco más de la mitad del ciclo, disminuyendo el ajuste en el final del ciclo.



**Figura 1.** ETc observada (PM-56) versus ETc predicha (RNA) en la Estación Meteorológica de Pozo Cañada para los años de 2011 (A) y 2012 (B) en el cultivo de cebolla.

Lo mismo ocurre en la estación de Tarazona (FIGURA 2), ya que en los dos años las predicciones siguen la misma tendencia de las observaciones. En la comparación mientras los dos años en Tarazona se percibe un mejor ajuste en el año 2012. Se nota que en el inicio del ciclo la gran cantidad de lluvia no afecta mucho el ajuste del modelo. Pero en el final del ciclo, una ligera lluvia hace con que el modelo sobrestime las observaciones (FIGURA 2B).



**Figura 2.** ETc observada (PM-56) versus ETc predicha (RNA) en la Estación Meteorológica de Tarazona para los años de 2011 (A) y 2012 (B) en el cultivo de cebolla.

Fueron hechas también comparaciones mientras los dos cultivos. Para esta comparación fueron utilizados datos de ETc calculados para el cultivo de maíz para los años de 2011 y 2012 en la estación de Tarazona (TABLAS 5 Y 6). Así se puede comparar los resultados del maíz con los de cebolla en la misma estación, presentados en las Tablas 3 y 4.

**Tabla 5.** Análisis estadístico de ajuste del modelo de predicción semanal de ETc en la estación de Tarazona por etapas del ciclo fenológico del cultivo de maíz en el año 2011.

Día	Etapa 1			Etapa 2			Etapa 3			Etapa 4		
	R <sup>2</sup> <sub>ajust.</sub>	E	d	R <sup>2</sup> <sub>ajust.</sub>	E	d	R <sup>2</sup> <sub>ajust.</sub>	E	d	R <sup>2</sup> <sub>ajust.</sub>	E	d
MD	0.88	0.88	0.97	0.71	0.72	0.91	0.85	0.82	0.94	0.77	0.78	0.93
1	0.88	0.88	0.97	0.73	0.73	0.92	0.85	0.83	0.94	0.77	0.77	0.93
2	0.88	0.88	0.97	0.71	0.71	0.91	0.86	0.83	0.95	0.79	0.79	0.94
3	0.87	0.88	0.97	0.69	0.69	0.89	0.85	0.83	0.94	0.81	0.81	0.94
4	0.87	0.87	0.96	0.71	0.69	0.89	0.91	0.89	0.96	0.80	0.80	0.94
5	0.87	0.87	0.96	0.72	0.67	0.88	0.90	0.88	0.96	0.79	0.79	0.94
6	0.88	0.88	0.96	0.73	0.68	0.88	0.91	0.89	0.97	0.80	0.80	0.94

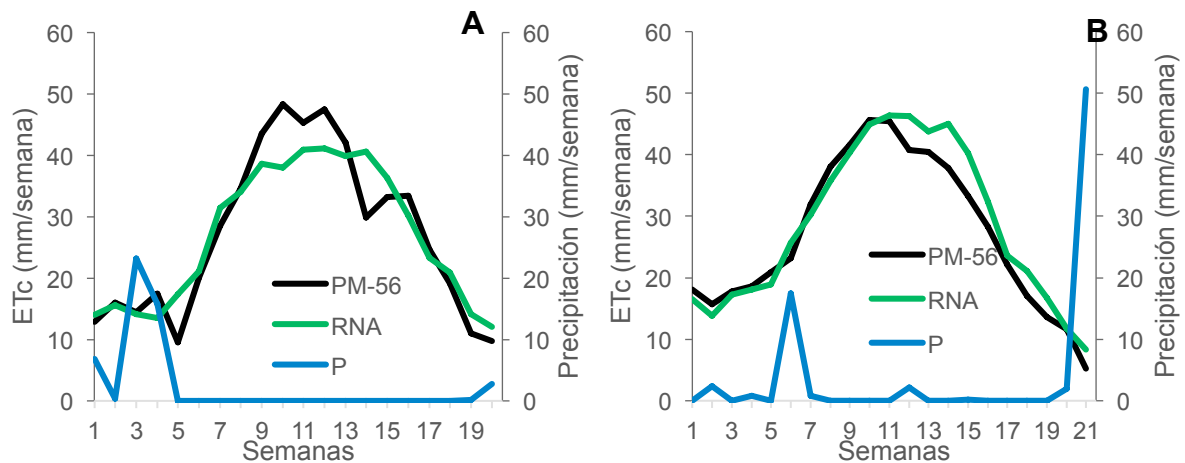
**Tabla 6.** Análisis estadístico de ajuste del modelo de predicción semanal de ETc en la estación de Tarazona por etapas del ciclo fenológico del cultivo de maíz en el año 2012.

Día	Etapa 1			Etapa 2			Etapa 3			Etapa 4		
	R <sup>2</sup> <sub>ajust.</sub>	E	d	R <sup>2</sup> <sub>ajust.</sub>	E	d	R <sup>2</sup> <sub>ajust.</sub>	E	d	R <sup>2</sup> <sub>ajust.</sub>	E	d
MD	0.98	0.97	0.99	0.83	0.86	0.96	0.93	0.92	0.98	0.91	0.86	0.96
1	0.97	0.95	0.99	0.77	0.81	0.94	0.91	0.89	0.98	0.91	0.86	0.96
2	0.94	0.92	0.98	0.74	0.78	0.94	0.91	0.89	0.98	0.91	0.86	0.96
3	0.94	0.91	0.98	0.77	0.80	0.94	0.92	0.89	0.98	0.91	0.87	0.96
4	0.94	0.91	0.98	0.81	0.81	0.81	0.93	0.90	0.98	0.91	0.86	0.96
5	0.94	0.92	0.98	0.81	0.83	0.95	0.94	0.92	0.98	0.91	0.86	0.96
6	0.94	0.91	0.98	0.78	0.80	0.94	0.94	0.92	0.98	0.91	0.87	0.97

MD = Mismo día.

Ahí se puede observar que el modelo también mantiene un buen ajuste para los 7 días de predicción en todas las etapas para el año 2011, presentando una ligera reducción del ajuste en la etapa 2. Ya en el año 2012, eventos de lluvia en la etapa 2 hicieron con que el modelo redujese su ajuste, reducción esta que puede ter sido ocasionada por dos lluvias con registros de 10.8 y 7 mm, totalizando 18 mm de lluvia en el período. En las etapas 1, 3 y 4 el modelo se presentó muy bien ajustado a los valores observados en la estación meteorológica.

A partir de ahí se ha podido hacer una comparación mientras los dos cultivos. En la Figura 3 se puede observar la ETc del cultivo de maíz en la estación de Tarazona para los años 2011 y 2012.



**Figura 3.** ETc observada (PM-56) versus ETc predicha (RNA) en la Estación Meteorológica de Tarazona para los años de 2011 (A) y 2012 (B) en el cultivo de maíz.

En la comparación mientras los cultivos se puede observar que el modelo se ajusta mejor al cultivo de maíz en las etapas 1 y 3, en cuanto en las etapas 2 y 4 el mejor ajuste se da en el cultivo de la cebolla.

Merece la pena resaltar que todos los modelos presentaron interferencia por efecto de la lluvia, lo que es común en los modelos de predicción de las necesidades de riegos de los cultivos.





#### 4 – Conclusiones y recomendaciones

Las predicciones presentan un buen ajuste en relación a los datos observados en las estaciones, lo que demuestra que el modelo puede ser utilizado como una herramienta adicional de ayuda a los regantes, que podrán tener una predicción de 7 días con una gran fiabilidad de los datos.

El modelo se ajusta muy bien a las etapas iniciales del maíz, presentando siempre valores de  $R^2$  superiores a 0.9.

Eventos de lluvia afectan considerablemente los modelos de predicción de ETo.

El modelo ofrece una oportunidad para que estas herramientas sirvan como mejora en la calidad de gestión de los recursos hídricos en España.

#### 5 – Agradecimientos

Agradezco al Proyecto IBrasil – Erasmus Mundus por financiar mis estudios de doctorado en la Universidad de Castilla-La Mancha.

#### 6 – Referencias

AEMET (2014). Datos de predicción y el tiempo por municipios. <<http://www.aemet.es/es/el tiempo/prediccion>> Desde Septiembre/2014 hasta Febrero/2015.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements FAO Irrigation and drainage paper No 56. Food and Agriculture Organization (FAO). Rome.

Ballesteros González, R. 2014. Predicción de evapotranspiración de referencia y empleo de modelos de tiempo térmico junto a información geomática en la caracterización de cultivos para la gestión del regadío en la Mancha Oriental. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, Universidad de Castilla La Mancha, Albacete, España.

Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture. 2007. Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture. London: Earthscan, and Colombo: International Water Management Institute.

ECMWF (2015). Forecast Datasets. < <http://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets>> Enero/2015.

MARM (2010). Estrategia nacional para la modernización sostenible H2015. Informe de sostenibilidad ambiental. (National strategy for sustainable irrigation modernization H2015. Environmental sustainability report). Resource document. Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino.

<[http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacionambiental/participacionpublica/2isa\\_eae\\_enmsrh2015\\_210710\\_parte1\\_tcm7-111305.pdf](http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacionambiental/participacionpublica/2isa_eae_enmsrh2015_210710_parte1_tcm7-111305.pdf)> Febrero/2015.



## EVALUACIÓN DE MODELOS AGROCLIMÁTICOS DE CÁLCULO DE EVAPOTRANSPIRACIÓN PARA JARDINERÍA. APLICACIÓN EN EL JARDÍN DEL CAMPUS DE VERA DE LA UPV

Clemente Angulo, S. (1), San Bautista, A. (2), Manzano, J. (3), Pascual-Seva, N (4)

<sup>1</sup>Graduada en Ingeniería Agroalimentaria y del Medio Rural. ETSIAMN-UPV, Camino de Vera, s/n 46022 Valencia. sanclean22@hotmail.com

<sup>2</sup>Profesor Titular. Universitat Politècnica de València, Centro Valenciano de Estudios sobre el Riego, Departamento de Producción Vegetal, Camino de Vera, s/n 46022 Valencia. asanbau@prv.upv.es

<sup>3</sup>Profesor Contratado Doctor. Universitat Politècnica de València, Centro Valenciano de Estudios sobre el Riego, Departamento Ingeniería Rural y Agroalimentaria, Camino de Vera, s/n 46022 Valencia. juamanju@agf.upv.es

<sup>4</sup>Profesora Ayudante Doctor. Universitat Politècnica de València. Centro Valenciano de Estudios sobre el Riego, Departamento de Producción Vegetal, Camino de Vera, s/n 46022 Valencia. asanbau@prv.upv.es

### Resumen

La evapotranspiración (ET) es la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación, y por otra parte, mediante transpiración del cultivo. Los factores relacionados con el cultivo y su manejo fueron englobados en la función empírica  $K_c = ET_c/ET_0$ , donde  $ET_c$  es la evapotranspiración de cultivo y  $ET_0$  es la evapotranspiración de referencia. Actualmente el método de Penman-Monteith es el recomendado por la FAO y la ASCE (American Society of Civil Engineers) para determinar la  $ET_0$ , requiriendo gran cantidad de parámetros climáticos como radiación, temperatura del aire, humedad atmosférica y velocidad del viento. Existen otros modelos de cálculo (como los propuestos por Hargreaves, Samani y Priestley-Taylor) más sencillos, que son evaluados en este trabajo, utilizando como caso de estudio el jardín de la Universitat Politècnica de València. Adicionalmente los métodos se recalibran, adaptando sus coeficientes empíricos por comparación con la ecuación de Penman-Monteith. Finalmente se realiza un balance de humedad contrastándolo con los valores obtenidos por medido de sondas FDR. Así se ha podido aproximar un valor del coeficiente  $K_j$  para el caso de estudio, que relaciona  $ET_0$  y  $ET_c$  en el caso singular de un jardín.

### 1- Introducción y objetivos

La evapotranspiración (ET) es la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde por evaporación a través de la superficie del suelo en contacto directo con el aire exterior, y por otra parte, mediante transpiración del cultivo a través de sus estomas. La evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) se define como la tasa de evapotranspiración de un cultivo hipotético de pasto, con una altura de 0,12 m, con una resistencia aerodinámica fija de 70 s m<sup>-1</sup> y un albedo de 0,23, es decir, de una superficie extensa de gramíneas verdes de altura uniforme, creciendo activamente y adecuadamente regado (Allen *et al.*, 1989). El concepto de evapotranspiración de referencia se introdujo para estudiar la demanda

evaporativa de la atmósfera independientemente del tipo de cultivo, de su estadio de desarrollo y de su manejo. Por lo tanto, depende solamente de factores climáticos.

El coeficiente de cultivo es el factor que incluye los efectos propios del cultivo sobre la ET, como pueden ser el área foliar, la altura, el porcentaje de suelo cubierto, etc. Su valor se determina como el cociente entre la evapotranspiración de cultivo y la evapotranspiración de referencia ( $K_c = ET_c / ET_0$ ) Doorenbos y Pruitt (1975),. Su empleo es válido para un cultivo homogéneo, mientras que para las situaciones típicas en jardinería con diversidad de especies en una parcela se emplea el coeficiente de jardín para describir las necesidades hídricas en las plantas. Según la metodología de Costello et al. (2000), se tienen en cuenta tres coeficientes en función de las especies que componen el jardín ( $K_e$ ), la densidad de plantación ( $K_d$ ) y las condiciones microclimáticas ( $K_m$ ). Por tanto, el coeficiente de jardín será igual al coeficiente de especie por el coeficiente de densidad por el coeficiente de microclima. Con el coeficiente de jardín se pueden estimar, de una forma similar al coeficiente de cultivo, las necesidades de agua a partir de la expresión:

$$ET_c = K_j \cdot ET_0$$

La evapotranspiración es uno de los principales componentes del balance hidrológico y su cuantificación es necesaria para la producción agrícola, especialmente en regiones áridas y semiáridas, donde resulta imprescindible para la determinación de las necesidades de agua de los cultivos y por tanto, para aplicar así el riego en cuantía adecuada. La ecuación del balance de humedad de Jensen et al. (1990) es la siguiente:

$$N_R = (N_{ET} - N_E - N_P - \Delta H) + N_{Pe}$$

donde:

$N_{ET}$  = necesidades de agua para cubrir las pérdidas de agua por ET den el jardín

$N_E$  = necesidades de agua para cubrir las pérdidas de agua por escorrentía superficial.

$N_P$  = necesidades de agua para cubrir las pérdidas de agua por percolación profunda.

$N_{Pe}$  = necesidades de agua cubiertas por precipitación efectiva.

$\Delta H$  = variación del contenido de agua en el suelo.

Para la medida de la evapotranspiración han sido desarrollados muchos procedimientos. Puede ser medida directamente utilizando un lisímetro, que es un gran contenedor abierto por su parte superior que engloba un volumen de suelo cuyo peso puede ser medido con precisión. También puede ser medida indirectamente estableciendo balances de agua en el volumen de suelo enraizado o balance de energía en la superficie foliar; del mismo modo es habitual el empleo de métodos estrictamente micrometeorológico

Actualmente el método de Penman-Monteith (Allen et al., 1998) es el único método recomendado por la FAO y por la ASCE (*American Society of Civil Engineers*) para determinar la evapotranspiración de referencia con parámetros climáticos de radiación, temperatura del aire, humedad atmosférica y velocidad del viento, ya que se aproxima de manera cercana la  $ET_0$  de cualquier localidad evaluada, tiene bases físicas sólidas e incorpora parámetros fisiológicos y aerodinámicos. Pero además, se dispone de una gran variedad de métodos para estimar la  $ET_0$  clasificados en función de las variables climáticas requeridas. Algunos métodos basados en temperatura son los de Hargreaves de 1975 y de 1985, y el de Samani (2000), que permiten el cálculo de la  $ET_0$  a partir de la temperatura y la radiación solar. Por otra parte, tenemos los métodos basados en radiación como el de Priestley-Taylor (1972) y el de Makkink (1957), que se basan en la alta correlación existente entre la evapotranspiración y la radiación solar.

El principal inconveniente que presenta la ecuación de Penman-Monteith es la gran cantidad de variables requeridas, ya que los registros de entrada de estas variables son, a veces, de calidad cuestionable, incompletos o no disponibles para un lugar determinado, especialmente en los países en desarrollo.

Por ello, el principal objetivo de este trabajo es evaluar modelos agroclimáticos de cálculo de la evapotranspiración de referencia más sencillos, utilizando como criterio de comparación la ecuación de Penman-Monteith. Además, también se pretende obtener un balance de humedad a partir de variables climáticas y parámetros de riego, con el fin de establecer un coeficiente de jardín en el jardín de la Universitat Politècnica de València (U.P.V.) que relacione la evapotranspiración de referencia y la evapotranspiración del cultivo.

## 2- Materiales y métodos

El estudio se realiza para el período de años de 2010 a 2013 a partir de los datos climáticos diarios y mensuales de radiación extraterrestre, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento, obtenidos de la estación meteorológica de la Universidad Politècnica de Valencia. La estación se encuentra a una latitud de 39° 40' E, a una longitud de 0° 22' y a una altitud de 11 m. Se midió la radiación extraterrestre ( $R_a$ ) máxima, mínima y media, en  $\text{wm}^{-2}$ , temperatura máxima, mínima y media, en °C; humedad relativa máxima, mínima y media, en % y la velocidad del viento ( $u_2$ ), en  $\text{m s}^{-1}$ , considerando la altura del anemómetro de 6,6 m.

Con los datos climáticos se calcula la  $ET_0$  utilizando los métodos de Penman-Monteith (Allen et al., 1998), Hargreaves (1975), Hargreaves (1985), Samani (2000) y Priestley-Taylor (1972), siendo la formulación de los métodos la expuesta en la Tabla 1

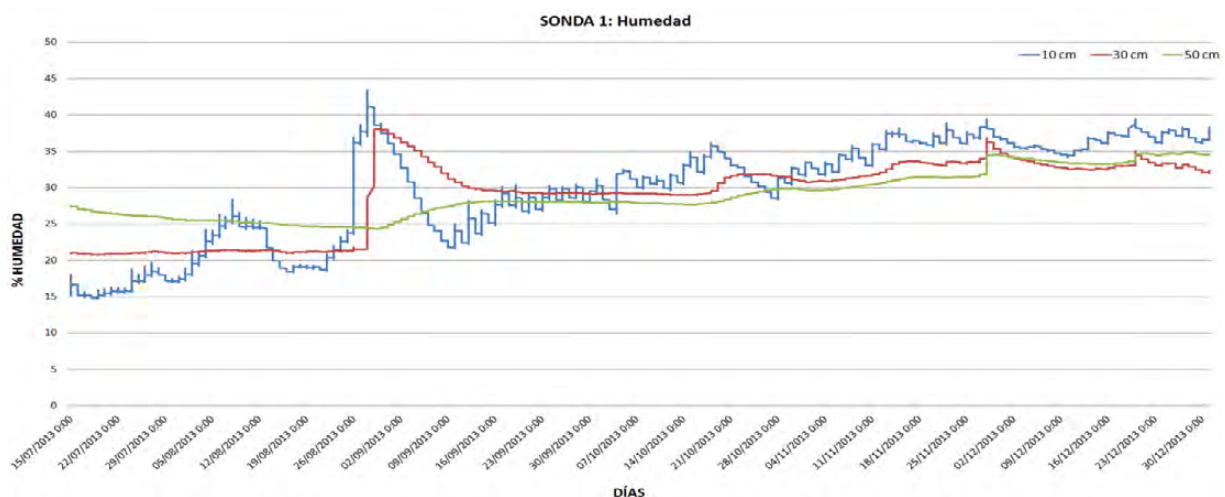
**Tabla 1.** Modelos propuestos para el cálculo de la evapotranspiración.

Método	Referencia	Ecuación
Método FAO/ASCE	Allen et al. ( 1998)	$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + C_d u_2)}$
Métodos de Temperatura	Hargreaves (1975)	$ET_{Har1} = A \cdot R_s \cdot (T_m + 17,8)$
	(Hargreaves 1)	$ET_{Har1} = A \cdot R_s \cdot (T_m + B)$
	Hargreaves (1985)	$ET_{Har2} = A \cdot R_a \cdot (T_m + 17,8) \cdot \Delta T^{1/2}$
	(Hargreaves 2)	$ET_{Har2} = A \cdot R_a \cdot (T_m + B) \cdot \Delta T^{1/2}$
		$ET_{Har2} = A \cdot R_a \cdot (T_m + B) \cdot \Delta T^C$
	Samani (2000)	$ET_{Sam} = 0,0135 \cdot (C \cdot R_a \cdot \Delta T^{1/2}) \cdot (T_m + 17,8)$ $C = (a_1 \cdot \Delta T^2) + (a_2 \cdot \Delta T) + a_3$
Método de Radiación	Priestley & Taylor (1972)	$\lambda ET_{Priest} = \alpha \cdot \left( \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \cdot (R_n - G)$
		$\lambda ET_{Priest} = \alpha \cdot \left( \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right)^B \cdot (R_n - G)^C$
$ET_0$ = evapotranspiración de referencia $R_n$ = radiación neta en la superficie del cultivo $G$ = flujo del calor del suelo $T$ = temperatura media del aire a 2 m de altura $u_2$ = velocidad del viento a 2 m de altura $e_s$ = presión de vapor de saturación $e_a$ = presión real de vapor $e_s - e_a$ = déficit de presión de vapor $\Delta$ = pendiente de la curva de presión de vapor $\gamma$ = constante psicrométrica		$R_s$ = radiación solar total $T_m$ = temperatura media diaria del aire $\Delta T$ = diferencia entre la temperatura máxima diaria y la temperatura mínima diaria $R_a$ = radiación extraterrestre $\alpha$ = albedo o coeficiente de reflexión = 1,26 $\Delta$ = Pendiente de la curva de presión de saturación de vapor $\lambda$ = calor latente $P$ = presión atmosférica $a_1, a_2, a_3$ = coeficientes de ec. Samani

Una vez calculada la  $ET_0$  con dichos métodos, aplicando valores diarios de las variables climáticas intervinientes en cada método y también valores medios para cada mes, se proponen la adaptación de los modelos con modificaciones en sus principales coeficientes. Para ello, se estiman los coeficientes de ajuste mediante una recalibración entre los valores de la  $ET_0$  de Penman-Monteith y las variables climáticas intervinientes en cada modelo, aplicando un ajuste no lineal para cada modelo estudiado. El programa utilizado para realizar el análisis estadístico fue el Statgraphics Centurion versión 16.1.17.

Como último paso y con el objeto de obtener un valor práctico del coeficiente de jardín para el caso de estudio, se calcula el balance de humedad del suelo obtenido como la diferencia que se produce entre las entradas de agua (por precipitación o riego) y las salidas (por evapotranspiración, despreciando las salidas de agua por escorrentía superficial y por percolación profunda).

Para la de medición de la humedad utilizada en el suelo del jardín de la U.P.V. se empleó una sonda FDR (*Frequency Domain Reflectometry*) a tres profundidades (10, 30 y 50 cm), obteniéndose los siguientes valores de humedad para el período del 15 de julio al 31 de diciembre de 2013.



**Figura 1.** Humedad en suelo medida por la sonda FDR a tres profundidades.

Para conocer el volumen de riego aportado se realizó un ensayo de pluviometría sobre la zona de influencia de la sonda, para un día sin viento. Se dispusieron 49 pluviómetros separados entre sí a 30 cm (matriz 7x7) y se regó la zona reproduciendo un riego ordinario de 15 minutos de duración. A partir de dicho ensayo se obtuvo el volumen de pluviometría y la dosis de riego aplicada en el jardín. Como método de riego se utilizó el riego por aspersión, con un marco de aspersión de 12x12. Los aspersores son modelo tipo SUPERPRO de Safe Rain. La especie de césped en la zona de nuestro ensayo fue una mezcla básica de cespitosas compuesta por *Cynodon dactylon*, *Festuca arundinacea*, *Penisetum clandestinum* y *Poa annua*.

Por otra parte, a partir de los datos de precipitación diarios obtenidos de la estación meteorológica de la U.P.V. se calculó la precipitación efectiva, como aquella fracción de la precipitación total que es aprovechada por las plantas, utilizando la siguiente expresión de Dastane (1974):  $Pe = 0,75 \times PT - 5$ . A partir de la dosis de riego, de la precipitación efectiva y de la  $ET_0$  de Penman-Monteith, se obtuvo el balance de humedad en el jardín.

Se comparó el contenido de humedad obtenido mediante el balance y el contenido de humedad medido mediante sondas FDR y ambos contenidos de humedad se ajustaron multiplicando por un valor las necesidades de agua para cubrir las pérdidas de agua por ET, aproximando de esta forma el coeficiente de jardín.

### 3- Resultados y discusión

En la tabla 2 se muestran las correlaciones entre las distintas variables climáticas utilizadas en este estudio y los valores estimados de la  $ET_0$  mensual y diaria utilizando los cuatro métodos alternativos con los valores originales de sus constantes.

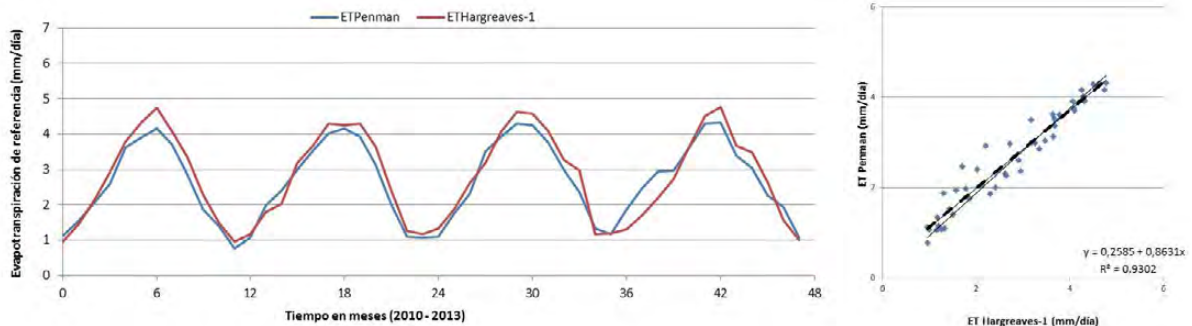
**Tabla 2.** Matriz de correlación entre las distintas variables climáticas y los valores estimados de  $ET_0$  mensual y diario (\*, \*\*: nivel de significación,  $P < 0,05$  y  $P < 0,01$ , respectivamente).

Matriz valores mensuales											
Variable	$R_a$	$R_s$	HR	$u^2$	$T_m$	$\Delta T$	$ET_{Priest}$	$ET_{Har1}$	$ET_{Har2}$	$ET_{Sam}$	$ET_{Pen}$
$R_a$	1										
$R_s$	0,97**	1									
HR	0,57**	0,53**	1								
$u^2$	0,10	0,05	-0,30	1							
$T_m$	0,74**	0,76**	0,72	-0,17	1						
$\Delta T$	-0,08	0,03	-0,48	-0,03	-0,37**	1					
$ET_{Priest}$	0,98**	0,97**	0,65**	0,01	0,85**	-0,14	1				
$ET_{Har1}$	0,95**	0,97**	0,63**	-0,02	0,88**	-0,11	0,99**	1			
$ET_{Har2}$	0,98**	0,97**	0,62**	0,01	0,84**	-0,10	0,99**	0,99**	1		
$ET_{Sam}$	0,98**	0,96**	0,64**	0,03	0,86**	-0,17	0,99**	0,98**	0,64**	1	
$ET_{Penm}$	0,96**	0,96**	0,51**	0,21	0,81**	-0,11	0,97**	0,97**	0,97**	0,97**	1
Matriz valores diarios											
Variable	$R_a$	$R_s$	HR	$u^2$	$T_m$	$\Delta T$	$ET_{Priest}$	$ET_{Harg1}$	$ET_{Harg2}$	$ET_{Sam}$	$ET_{Pen}$
$R_a$	1										
$R_s$	0,77**	1									
HR	0,29**	0,07**	1								
$u^2$	0,05	-0,03	-0,31**	1							
$T_m$	0,70**	0,59**	0,31**	-0,03	1						
$\Delta T$	-0,03	0,20**	-0,29**	-0,20**	-0,02	1					
$ET_{Priest}$	0,92**	0,87**	0,30**	-0,01	0,79**	0,02	1				
$ET_{Har1}$	0,81**	0,92**	0,15**	-0,01	0,76**	0,18**	0,91**	1			
$ET_{Har2}$	0,91**	0,77**	0,22**	-0,02	0,79**	0,23**	0,91**	0,86**	1		
$ET_{Sam}$	0,94**	0,75**	0,28**	0,02	0,83**	0,07**	0,92**	0,85**	0,95**	1	
$ET_{Penm}$	0,83**	0,80**	-0,01	0,31**	0,72**	0,04	0,89**	0,82**	0,82**	0,83**	1

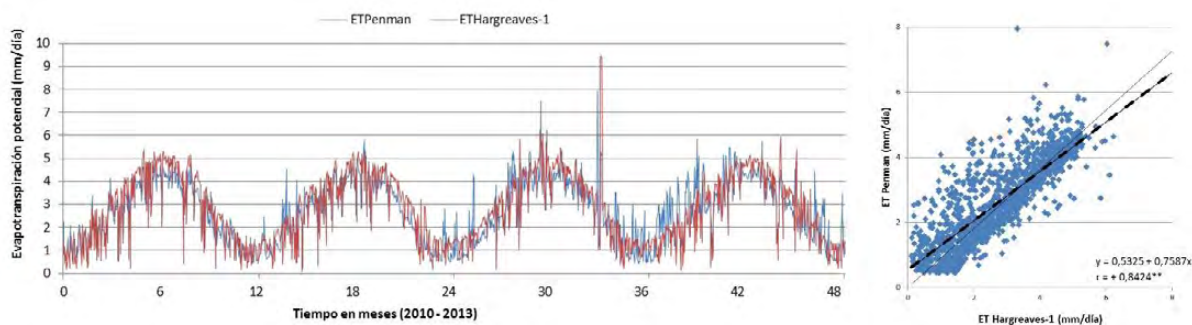
Para los valores mensuales se puede observar que se han obtenido correlaciones muy positivas y estadísticamente significativas entre la variable  $R_s$  y entre los valores de  $ET_{Priest}$ ,  $ET_{Harg1}$ ,  $ET_{Harg2}$ ,  $ET_{Sam}$ ,  $ET_{Penm}$ , mientras que la correlación entre la variable  $u_2$  y las variables HR,  $T_m$ ,  $\Delta T$  es negativa. Para los valores diarios se puede ver que también se han obtenido correlaciones muy positivas y estadísticamente significativas entre la variable  $R_s$  y entre los valores diarios de  $ET_{Priest}$ ,  $ET_{Harg1}$ ,  $ET_{Harg2}$ ,  $ET_{Sam}$ ,  $ET_{Penm}$ . Por último, entre la variable  $\Delta T$  y las variables HR y  $u_2$  se obtienen correlaciones negativas y estadísticamente significativas.



A modo de ejemplo se muestra en las siguientes figuras los valores de la evapotranspiración mensual (Figura 2) y diaria (Figura 3) para el método de Hargreaves (1975) comparado con el método de Penman-Monteith. Para obtener una comparación más cuantitativa, las correlaciones estimadas entre los cuatro métodos alternativos y el método de Penman-Monteith fueron analizadas usando una ecuación de regresión lineal.  $Y = mX + c$ , donde Y representa la ET calculada con la Ecuación de Penman-Monteith y X es la ET estimada a partir de los cuatro métodos mencionados anteriormente, siendo m y c constantes que representan la pendiente y la intersección de la ecuación de regresión, respectivamente



**Figura 2.** Gráfico de la evapotranspiración de referencia mensual calculada con el método de Penman-Monteith y el método de Hargreaves11 (Izq.) y su comparación mediante regresión lineal (dcha).



**Figura 3.** Gráfico de la evapotranspiración de referencia diaria calculada con el método de Penman-Monteith y el método de Hargreaves-1 (Izq.) y su comparación mediante regresión lineal (dcha).

En relación a la ET mensual, y respecto a los valores del coeficiente de correlación r, el método de Priestley-Taylor tiene el más alto con  $r = 0,9730$  y el método Hargreaves-1, tiene el valor más bajo con  $r = 0,9691$ . En cuanto a la pendiente de las ecuaciones de regresión, el método de Hargreaves-1 resultó con una pendiente cercana a la unidad (0,8631). Respecto a la ET diaria, el método de Priestley-Taylor tiene el valor del coeficiente de correlación más alto con 0,8862 y el método de Hargreaves-2 presenta el valor más bajo con  $r = 0,8191$ . Finalmente la pendiente de las ecuaciones de regresión, el método de Samani tiene la pendiente más cercana a la unidad (0,7918).

En la tabla siguiente se muestran los valores de los parámetros originales y los valores adoptados después de la recalibración para cada ecuación alternativa y el nivel de significación. Para valores mensuales de ET, se puede comprobar que el método que presenta el coeficiente de determinación  $R^2$  más elevado es el de Hargreaves-2 (de 0,9509), utilizando la recalibración de los parámetros A, B y C de la ecuación. Para valores diarios de

ET, se observa que el método con R<sup>2</sup> más elevada es el de Priestley-Taylor (de 0,7809) utilizando la recalibración de los parámetros  $\alpha$ , B y C de la ecuación.

**Tabla 3.** Comparación de los valores de los parámetros de las ecuaciones antes y después de la recalibración, para valores mensuales de evapotranspiración

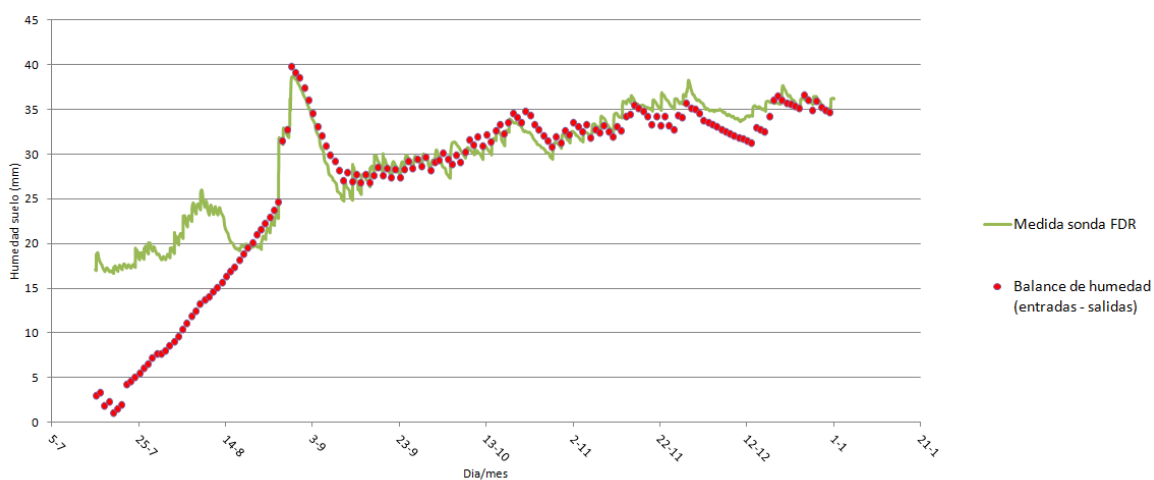
Valores mensuales					
Referencia	Ecuación	Valores de los parámetros			
		Original	Recalibrado	R <sup>2</sup>	Probabilidad
Har1(1975)	ET = A · R <sub>s</sub> · (T <sub>m</sub> + 17,8)	A = 0,0135	A = 0,0127	0,9303	< 0,00001
	ET = A · R <sub>s</sub> · (T <sub>m</sub> + B)	A = 0,0135 B = 17,8	A = 0,0076 B = 43,7209	0,9466	< 0,00001
Har2(1985)	ET = A · R <sub>a</sub> · (T <sub>m</sub> + 17,8) · ΔT <sup>1/2</sup>	A = 0,0023	A = 0,0020	0,9413	< 0,00001
	ET = A · R <sub>a</sub> · (T <sub>m</sub> + B) · ΔT <sup>1/2</sup>	A = 0,0023 B = 17,8	A = 0,0015 B = 30,0078	0,9472	< 0,00001
	ET = A · R <sub>a</sub> · (T <sub>m</sub> + B) · ΔT <sup>C</sup>	A = 0,0023 B = 17,8 C = 0,5	A = 0,0026 B = 38,8791 C = 0,1833	0,9509	< 0,00001
Sam. (2000)	ET = 0,0135 · (C · R <sub>a</sub> · ΔT <sup>1/2</sup> ) · (T <sub>m</sub> + 17,8) C = (a <sub>1</sub> · ΔT <sup>2</sup> ) + (a <sub>2</sub> · ΔT) + a <sub>3</sub>	a <sub>1</sub> = 0,00185 a <sub>2</sub> = - 0,0433 a <sub>3</sub> = 0,4023	a <sub>1</sub> = 0,00094 a <sub>2</sub> = - 0,0181 a <sub>3</sub> = 0,2362	0,9417	< 0,00001
Priest (1972)	λET = α · (Δ / (Δ + γ)) · (R <sub>n</sub> - G)	α = 1,26	α = 0,5043	0,7875	< 0,00001
	λET = α · (Δ / (Δ + γ)) <sup>B</sup> · (R <sub>n</sub> - G) <sup>C</sup>	α = 1,26 B = 1 C = 1	α = 0,9945 B = 0,5123 C = 0,6269	0,9410	< 0,00001
Valores diarios					
Referencia	Ecuación	Valores de los parámetros			
		Original	Recalibrado	R <sup>2</sup>	Probabilidad
Har1(1975)	ET = A · R <sub>s</sub> · (T <sub>m</sub> + 17,8)	A = 0,0135	A = 0,0123	0,6936	< 0,00001
	ET = A · R <sub>s</sub> · (T <sub>m</sub> + B)	A = 0,0135 B = 17,8	A = 0,0108 B = 23,0782	0,6948	< 0,00001
Har2(1985)	ET = A · R <sub>a</sub> · (T <sub>m</sub> + 17,8) · ΔT <sup>1/2</sup>	A = 0,0023	A = 0,0020	0,6753	< 0,00001
	ET = A · R <sub>a</sub> · (T <sub>m</sub> + B) · ΔT <sup>1/2</sup>	A = 0,0023 B = 17,8	A = 0,0017 B = 26,0616	0,6777	< 0,00001
	ET = A · R <sub>a</sub> · (T <sub>m</sub> + B) · ΔT <sup>C</sup>	A = 0,0023 B = 17,8 C = 0,5	A = 0,0036 B = 27,7911 C = 0,1291	0,7312	< 0,00001
Sam. (2000)	ET = 0,0135 · (C · R <sub>a</sub> · ΔT <sup>1/2</sup> ) · (T <sub>m</sub> + 17,8) C = (a <sub>1</sub> · ΔT <sup>2</sup> ) + (a <sub>2</sub> · ΔT) + a <sub>3</sub>	a <sub>1</sub> = 0,00185 a <sub>2</sub> = - 0,0433 a <sub>3</sub> = 0,4023	a <sub>1</sub> = 0,00029 a <sub>2</sub> = - 0,0117 a <sub>3</sub> = 0,2330	0,7241	< 0,00001
Priest (1972)	λET = α · (Δ / (Δ + γ)) · (R <sub>n</sub> - G)	α = 1,26	α = 0,5008	0,6781	< 0,00001
	λET = α · (Δ / (Δ + γ)) <sup>B</sup> · (R <sub>n</sub> - G) <sup>C</sup>	α = 1,26 B = 1 C = 1	α = 1,2508 B = 0,9304 C = 0,5979	0,7809	< 0,00001

Utilizando la recalibración de los valores constantes de A y B en el método de Hargreaves-1, mejora el coeficiente de correlación de 0,9691 a 0,9729. En cuanto al método de Hargreaves-2, se observa que con los valores originales de las constantes funciona bastante bien, y que presenta un coeficiente de correlación mayor que con el método anterior

(de 0,97). Utilizando los valores A, B y C recalibrados el método mejora ligeramente. La ecuación de Samani también funciona bastante bien con los valores originales de las constantes y tras la recalibración de sus coeficientes, los resultados permanecen prácticamente invariables. En cuanto al método de Priestley -Taylor, el valor de  $\alpha = 1,26$  resulta demasiado elevado para la región. Se observa que se logra una importante mejora cuando se utilizan las constantes  $\alpha$ , B y C recalibradas. Si bien, el coeficiente de correlación se mantiene.

En relación a la evapotranspiración diaria, se obtienen coeficientes de correlación menores que con datos mensuales de  $ET_0$ , aunque los resultados también son estadísticamente significativos. El método de Hargreaves-1 funciona bastante bien con los valores originales de las constantes y tras la recalibración, los resultados prácticamente no varían. El método de Hargreaves-2 con los valores originales de sus constantes es el que presenta el valor más bajo de coeficiente de correlación con  $r = 0,819$ . Tras la recalibración, se comprueba que el método mejora su coeficiente de correlación de 0,819 a 0,851, cuando se utilizan los valores A, B y C recalibrados. El método de Samani, con los valores originales de sus constantes, es el que presenta la pendiente de la ecuación más cercana a la unidad (0,7918). Tras la recalibración, se constata que el método mejora ligeramente (su coeficiente de correlación pasa de 0,8316 a 0,8525). En relación al método de Priestley-Taylor, con los valores originales de sus constantes es el método que presenta el valor de coeficiente de correlación más alto (0,8862) para valores de ET diarios, pero al igual que en el caso mensual, se observa que el valor de  $\alpha = 1,26$  de la ecuación es demasiado alto para la región. Por último, se logra una importante mejora en el método de Priestley-Taylor cuando se utilizan las constantes  $\alpha$ , B y C recalibradas; si bien el coeficiente de correlación se mantiene.

En la última fase se procede a estimar el coeficiente de jardín. A partir del experimento de pluviometría comentado, se obtuvo una dosis de riego de 1,86 mm. Con esta dosis de riego, la  $ET_0$  de Penman-Monteith y la precipitación efectiva calculada, se obtuvo el balance de humedad en el suelo. En la siguiente figura se representa el contenido de humedad calculado mediante el balance de humedad y contenido de humedad en el suelo medido mediante sondas FDR. Para ligar ambos conjuntos de valores, la  $ET_0$  de Penman-Monteith en la ecuación del balance ha sido ajustada con un factor de 0,4, asimilable al coeficiente de jardín y comparable al obtenido en otros trabajos.



**Figura 1.** Gráfico del contenido de humedad en el suelo medido mediante sondas FDR y el contenido de humedad calculado mediante el balance de entradas y salidas de agua.

#### 4- Conclusiones

Se ha obtenido una correlación muy positiva y estadísticamente significativa entre la radiación solar y la evapotranspiración calculada con los métodos de Hargreaves y Priestley-Taylor, constatándose que dicha variable es el principal factor que interviene en las ecuaciones de ambos métodos. Se ha obtenido una correlación negativa y estadísticamente significativa entre la velocidad del viento ( $u_2$ ) y la diferencia entre las temperaturas máxima y mínima diarias ( $\Delta T$ ), verificándose que en las zonas costeras la elevada  $u_2$  tiende a reducir la temperatura.

Se observa que con datos mensuales de  $ET_0$  se obtienen coeficientes de correlación mucho más elevados que con datos diarios, si bien, los modelos matemáticos en ambos casos han resultado ser estadísticamente significativos.

Con datos mensuales de  $ET_0$ , de los modelos matemáticos estudiados en este trabajo, el mejor resultado se ha obtenido con el método de Hargreaves (1985) con la siguiente modificación de sus coeficientes:  $ET_0 = 0,0026 \cdot R_a \cdot (T_m + 38,8791) \cdot \Delta T^{0.1833}$ ; con  $R^2 = 0,9509$ .

Para datos diarios de  $ET_0$ , de los modelos matemáticos estudiados en este trabajo, el mejor resultado se ha obtenido con el método Priestley-Taylor con la siguiente modificación de sus coeficientes:  $\lambda ET = 1,2508 \cdot \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma}\right)^{0,9304} (R_n - G)^{0,5979}$ ; con  $R^2 = 0,7809$ .

Por otra parte, se observa una buena correlación entre los niveles de humedad en el suelo y las pérdidas de agua por evapotranspiración calculadas con el método de Penman-Monteith. El valor de  $K_j$  que se puede proponer según nuestro experimento de campo sería de 0,4 para el caso de estudio.

Por último, decir que los modelos estudiados podrían ser utilizados como alternativa al método de Penman-Monteith para las condiciones climáticas de la ciudad de Valencia.

#### 5.- Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la ayuda SP20120823 del Programa de Apoyo a la Investigación y Desarrollo (PAID-06-12) del Vicerrectorado de Investigación de la Universitat Politècnica de València a través del proyecto "Estrategias para el ahorro de agua y energía en jardinería Mediterránea. Comparación de las necesidades de riego determinadas con modelos agro-hidrológicos y sondas de humedad de suelo e integración en la gestión hidráulica".

#### 6.- Bibliografía

- Allen, R.G., Jensen, M.E, Wright, J.L. and Burman, R.D. (1989). Operational estimates of reference evapotranspiration. *Agronomy Journal*, 81: 650-662.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M. (1998). *Crop Evapotranspiration*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Rome. 300 pp.
- Costello, L. R. and Jones, K. S. (2000). *Water use classification of landscape species. A guide to the water needs of landscape plants*. California Department of Water Resources. University of California Cooperative Extension. 150 pp.
- Dasante, N.G. (1974). *Effective rainfall in irrigated agriculture*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 25. Rome. 62 pp.



- Doorenbos, J. and Pruitt, W.O. (1977). Crop water requirements. FAO Estudio de Riego y Drenaje No. 24, (rev.). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma. 144 pp.
- Hargreaves, G.H. (1975). Moisture availability and crop production. *Transaction of the American Society of Civil Engineers*, 18 (5): 980-984.
- Hargreaves, G.L.; Hargreaves, G.H. and Riley, J.P. (1985). Agricultural benefits for Senegal River Basin. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 111: 113-124.
- Hargreaves, G.H. and Samani, Z.A. (1985). Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1 (2): 96-99.
- Jensen, M.E.; Burman, R.D. and Allen, R.G. (1990). Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practices No. 70, American Society of Civil Engineers. New York, Estados Unidos de América. 360 pp.
- Makkink, G.F. (1957). Testing the Penman formula by means of lysimeters. *Journal of the Institute of Water Engineers*, 11 (3): 277-288.
- Priestley, C.H.B. and Taylor, R.J. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. *Monthly Weather Review*, 100: 81-92.
- Samani, Z.A. (2000). Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126 (4): 265-267.

## APLICACIÓN DE DIFERENTES SOLUCIONES NUTRITIVAS Y DOSIS DE RIEGO EN CULTIVO DE *Physalis peruviana* L.

Gromaz, A.<sup>1</sup>(P), Torres, J.F.<sup>2</sup>, Pascual Seva, N.<sup>3</sup>, San Bautista, A.<sup>3</sup>, López Galarza, S., Pascual, B.<sup>3</sup>, Alagarda, J.<sup>3</sup>, Maroto, J.V.<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> Becario de Especialización. CVER. Universitat Politècnica de València. Camino de Vera s/n, 46022 Valencia [angroroi@etsia.upv.es](mailto:angroroi@etsia.upv.es)

<sup>2</sup> Investigador, CVER. Universitat Politècnica de València. [jotorru@upvnet.upv.es](mailto:jotorru@upvnet.upv.es)

<sup>3</sup> Profesor, Departamento de Producción Vegetal, Universitat Politècnica de València. Camino de Vera s/n, 46022 Valencia [asanbau@prv.upv.es](mailto:asanbau@prv.upv.es)

### Resumen

El objetivo del presente estudio fue evaluar la respuesta de las plantas de *Physalis* a la aplicación de diferentes dosis de riego y soluciones nutritivas, en términos productivos y de desarrollo vegetativo. Para ello, se emplearon dos dosis de riego D1 (dosis baja: 50%ET<sub>c</sub>) y D2 (dosis media: 100%ET<sub>c</sub>) y tres soluciones nutritivas con diferentes concentraciones de nitratos S1 ([NO<sub>3</sub><sup>-</sup>] = 7.91 mmol·L<sup>-1</sup>); S2 ([NO<sub>3</sub><sup>-</sup>] = 12.41 mmol·L<sup>-1</sup>); S3 ([NO<sub>3</sub><sup>-</sup>] = 16.91 mmol·L<sup>-1</sup>). Las mejores respuestas productivas se dieron con la solución S2 y la dosis D2 debido al mayor número de frutos formados. El aumento de la concentración de nitratos aumentó la cosecha con la dosis D1 mientras que la redujo con la dosis D2. Las plantas con un mayor peso seco de la parte aérea y mayor altura se obtuvieron con las soluciones S2 y S3 y la dosis D2. Las soluciones nutritivas empleada y la dosis de riego no ejercieron influencia en las características cualitativas de los frutos. Las mayores eficiencias de riego se consiguieron con las soluciones S2 y S3 con la dosis de riego más baja (D1).

### 1. Introducción

El alquequenje o *Physalis* (*Physalis peruviana* L.) es una especie herbácea, que se aprovecha por sus frutos comestibles, de forma globosa y de color amarillo o anaranjado, que se encuentran recubiertos por el cáliz formando una especie de farolito (Maroto, 2002).

El "cracking" o rajado de los frutos es uno de los principales problemas fisiológicos que afectan la calidad y la rentabilidad en el cultivo de esta especie. Debido a su incidencia en cosecha y en poscosecha, provoca la pérdida de más del 30% de la producción (Gordillo et al., 2004) llegando a alcanzar el rechazo en la exportación, en periodos de lluvia, un valor de hasta el 50% (Fischer, 2005). Su aparición, se ha atribuido principalmente al balance hídrico de las plantas, que afecta a la velocidad de crecimiento y la producción de frutos, siendo la variación en el contenido de humedad del suelo el principal desencadenante (Kamimura et al., 1972).

La aplicación excesiva de fertilizantes, superior a los requerimientos del cultivo, especialmente el caso del nitrógeno, puede provocar un crecimiento exuberante de las plantas, que actuaría en detrimento de la producción. En otras ocasiones, estas aportaciones no resultan perjudiciales para el rendimiento y la calidad de los frutos, pero incrementan los costos de producción y son una fuente de contaminación del suelo y acuíferos subterráneos. Por ello resulta de gran interés conocer las necesidades de la planta y establecer un protocolo de fertilización que se ajuste a las mismas (Maroto, 2009).

Uno de los factores más restrictivos en la producción hortícola es la disponibilidad de agua de riego, por ese motivo, resulta de gran importancia conocer cuáles son las



necesidades del cultivo, y cómo afectan a la producción y a los parámetros de calidad de los frutos, la utilización de diferentes volúmenes y sistemas de riego. En cultivo sin suelo el aporte del riego debe hacerse de manera que se compensen las necesidades de la planta, evitar la acumulación de sales en el sustrato y mantener una adecuada oxigenación. Para conseguir estos objetivos, el volumen de riego aplicado debe situarse por encima de las necesidades de la planta, introduciendo un porcentaje de drenaje, situado entre el 20 o 25 % del total de volumen aplicado, que servirá para llevar a cabo el lavado del exceso de sales (Baixauli y Aguilar, 2002).

En relación con esta necesidad, se han realizado distintos experimentos para determinar cuál es la respuesta productiva de las plantas al riego. Así, en experiencias llevadas a cabo con tomate (Pascual et al., 2000; Ortega-Farías et al., 2001; Ortega-Farías et al., 2003) un incremento del volumen de riego llevó asociado un aumento de la cosecha. Sin embargo, en otros estudios con tomate (Malorgio et al., 1991; San Bautista et al., 2004 a) y melón (Ribas et al., 2001; Cabello et al., 2009) se constató que, a partir de una determinada cantidad de agua aportada, no se obtenía un incremento en la producción, debido a la disminución en la eficiencia del riego.

Otro factor importante a tener en cuenta cuando se estudia la aplicación de distintas dosis de riego es establecer su influencia sobre el desarrollo vegetativo de las plantas, el cual, al ser excesivo, puede actuar en detrimento de la producción final. En ensayos con tomate (San Bautista et al., 2004 a) y melón (San Bautista et al., 2004 b) se ha obtenido que el incremento de las dosis de riego se tradujo en un mayor desarrollo vegetativo de las plantas, estimado éste en términos de altura de la planta y grosor de los tallos.

Finalmente, el riego puede afectar a la calidad final de los frutos. Así, en cultivo de tomate, el aumento del volumen de riego aplicado supuso una reducción de la firmeza de los frutos (San Bautista et al., 2004 a), del contenido en sólidos solubles (Malorgio et al., 1991; Mitchell et al., 1991; Ortega-Farías et al., 2001; 2003; San Bautista et al., 2004 a) y de la acidez de los frutos (Malorgio et al., 1991; Mitchell et al., 1991; San Bautista et al., 2004 a). El objetivo del presente estudio fue evaluar la respuesta de las plantas de *Physalis* a la aplicación de diferentes dosis de riego y soluciones nutritivas, tanto en términos productivos (cantidad producida y calidad de la cosecha) como de desarrollo vegetativo.

## 2. Materiales y métodos.

Las plantas utilizadas en la experiencia, procedían de un semillero realizado el 4 de febrero de 2013, en bandejas de poliestireno de 54 alvéolos rellenas de vermiculita. La plantación definitiva en el invernadero se produjo el 11 de abril de 2013, en macetas de 35 cm de diámetro (25 L), empleando perlita como sustrato de cultivo, y disponiéndose una planta por contenedor.

La aportación de nutrientes se hizo a través de fertirrigación, con un sistema de riego localizado de alta frecuencia, mediante el que se aplicaban las soluciones nutritivas utilizadas. Las dosis de riego empleadas fueron:

- **D1** (dosis baja): 50%  $ET_c$
- **D2** (dosis media): 100%  $ET_c$

**Tabla 1.** Composición de las soluciones nutritivas ( $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ )

Solución nutritiva	$\text{NO}_3^-$	$\text{H}_2\text{PO}_4^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{NH}_4^+$	K+	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	CE (dS/m)
S1	7.91	1.20	2.45	0.50	4.00	3.70	1.46	1.56
S2	12.41	1.20	2.45	0.50	5.00	3.95	2.96	2.01
S3	16.91	1.20	2.45	0.50	6.00	4.20	4.46	2.46

Se eligió un diseño de bloques al azar con 3 soluciones nutritivas (S1, S2 y S3), 2 dosis de riego (D1 y D2) con 3 U.R. (unidades de repóición) de 5 plantas cada una. Para cada combinación de soluciones y dosis, con un total de 18 U.R. y 90 plantas. Para aportar las distintas dosis, el sistema de riego estaba constituido por 1 gotero de 2 L·h<sup>-1</sup> por planta para la D1, y el doble para la D2.

El manejo del riego se hizo intentando mantener el porcentaje de drenaje de la dosis D1 cerca entre el 10-15 % y el de la dosis D2 en valores situados entre el 30 y el 35 %. Se utilizó para llevar a cabo la experiencia un sistema automatizado en el que el número de riegos necesario para alcanzar el volumen de drenaje establecido se controló a través de cambios en los valores del paquete radiativo necesario para efectuar 1 riego (a igualdad de radiación, al aumentar el valor del paquete radiativo la frecuencia de riegos era menor y viceversa). Se estableció en 2 minutos la duración de cada riego. En las Tablas 2.1., 2.2. se recogen los valores (por planta) del volumen de solución aportado y porcentaje de drenaje (%).

**Tabla 2.1.** Volumen de solución aportado por planta (mL)

	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Enero	Febr.
D1	13400	41900	37320	24440	22550	14700	13800	13700	12600	10400
D2	26800	83800	74640	48880	45100	29400	27600	27400	25200	20800

**Tabla 2.2.** % Drenaje

	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Enero	Febr.
S1 D1	13.1	9.3	19.0	11.5	14.6	12.1	15.1	9.5	7.1	8.7
S1 D2	37.1	26.5	38.6	30.8	30.7	32.8	35.7	29.0	24.6	28.6
S2 D1	12.9	9.9	20.0	10.8	14.9	11.1	14.1	12.2	14.6	11.3
S2 D2	36.6	29.0	40.6	30.8	31.4	30.7	37.0	33.3	35.7	32.1
S3 D1	12.9	4.8	19.0	9.5	14.7	9.4	15.5	15.8	20.7	14.8
S3 D2	40.4	24.9	39.9	28.5	31.0	28.0	38.3	38.4	44.6	35.4

Al finalizar el cultivo se calculó la eficiencia del riego mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Eficiencia de riego} = \frac{\text{Producción total Kg}}{\text{m}^3 \text{ solución nutritiva aportada}}$$

Con objeto de llevar a cabo un control de la influencia de las dosis de riego sobre el desarrollo vegetativo, una vez al mes, se tomaron medidas de la altura de la planta (con una cinta métrica) y del diámetro del tallo (con un pie de rey modelo Hommel Hercules). Estas mediciones se efectuaron sobre las 5 plantas de cada repetición. Para que las medidas del grosor del tallo fueran fiables, esta medida se realizó siempre en el mismo lugar situado por encima del primer nudo, unos 2 cm sobre la superficie del sustrato. Además, al final del cultivo se tomó el peso fresco y seco de las hojas y de los tallos. Para realizar las medidas del peso seco de hojas y tallos se introdujeron en una estufa a 65 ° hasta que alcanzaron un peso constante.

Posteriormente, se tomaba de cada repetición la cantidad necesaria de frutos, para que pudieran ser triturados en un vaso de plástico con una batidora. El triturado obtenido se filtraba con un colador, realizándose una medida de °Brix con un refractómetro digital ATAGO Palette PR-32. Del filtrado se tomaron 6 g que se introducían en un vaso de precipitado, añadiéndose agua destilada hasta alcanzar un volumen de 150 cc. El resultado fue una suspensión, que se valoró con NaOH 0.1 N (el punto final se alcanzaba cuando el pHmetro registraba un valor de 8.1), proceso durante el que la suspensión se mantenía en movimiento con un agitador magnético. Para el cálculo de la acidez titulable se empleó la siguiente fórmula:

$$AT(\%) = \frac{[\text{mL (NaOH)} \times N \times 0.064] \times 100}{\text{Peso Physalis triturado (g)}}$$

Donde N es la normalidad del NaOH. Los resultados de acidez titulable (AT) se presentan como mL de ácido cítrico/100 g de fruto de Physalis, por ser el ácido cítrico el mayoritario de este fruto. El índice de madurez se obtuvo mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Índice de madurez} = \frac{^{\circ}\text{Brix}}{TA(\%)}$$

El inicio de la recolección se produjo el día 11 de julio de 2013 extendiéndose hasta el 10 de febrero de 2014, con pases semanales.

### 3. Resultados y discusión

Las soluciones nutritivas con un contenido más elevado en nitratos (S2 y S3) produjeron un mayor número de frutos que la solución S1 ( $p \leq 0.05$ ) (Tabla 3). Sin embargo, la producción más elevada se alcanzó con la S2 ( $p \leq 0.05$ ); con la solución S3 se produjo un descenso de la cosecha que aún fue más acusado con la S1 (Tabla 3). El incremento de la dosis de riego llevó a aparejado un aumento tanto del número de frutos, como de la producción final ( $p \leq 0.05$ ;  $p \leq 0.05$ ) (Tabla 3).

El efecto de las soluciones nutritivas y las dosis de riego en la incidencia los distintos tipos de “cracking”, no fue e.s. (Tabla 3).

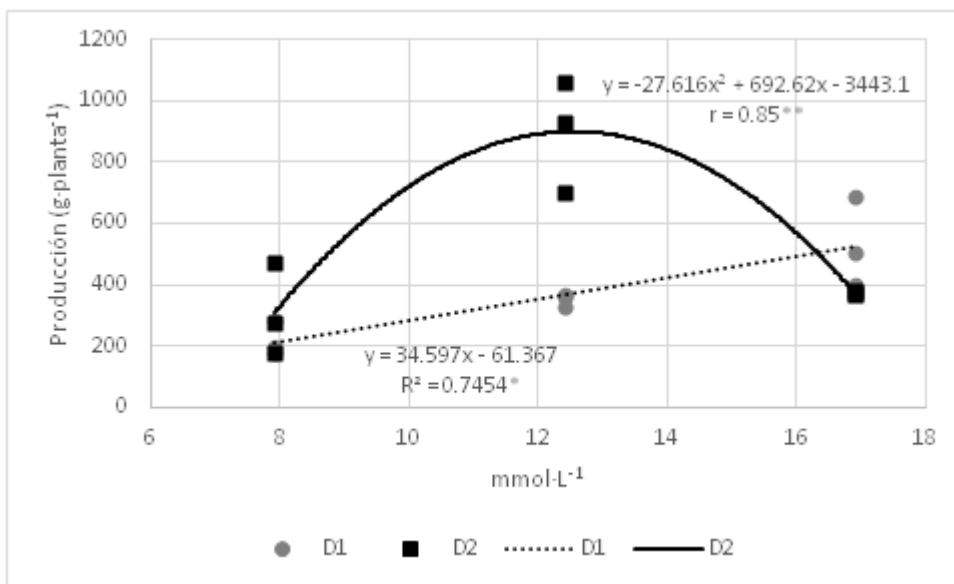
**Tabla 3.** Parámetros productivos.

	Número total de frutos	Producción total (g)	Frutos comerciales (%)	Frutos afectados por fisiopatías (%)		
				cc	cl	cc + cl
<b>Solución</b>						
S1	148.9 b	263.5 c	59.67 -	4.43 -	12.83 -	22.40 -
S2	344.9 a	626.5 a	59.83 -	5.25 -	11.17 -	23.48 -
S3	273.7 a	461.6 b	60.45 -	2.85 -	16.42 -	20.05 -
<b>Dosis de riego</b>						
D1	215.3 b	374.7 b	58.63 -	4.34 -	13.91 -	22.70 -
D2	296.4 a	526.4 a	61.33 -	4.01 -	13.03 -	21.26 -
<b>Resumen ANOVA (g.l.)</b>			<b>%</b>	<b>Suma de cuadrados</b>		
<b>Factor</b>						
Solución (2)	34.5**	36.6**	0.2 ns	29.7 ns	20.3 ns	7.2 ns
Dosis (1)	8.6*	9.6*	3.8 ns	0.8 ns	0.8 ns	1.8 ns
<b>Interacción</b>						
Sol x Dosis (2)	38.5**	37.1**	5.1 ns	7.0 ns	20.0 ns	0.2 ns
Residual (12)	18.4	16.8	90.9	62.5	58.9	90.8
Desv. estándar	72.5	123.1	8.1	1.8	4.6	6.3

Letras diferentes indican diferencias e.s.  $p \leq 0.05$ ; \* y \*\* indican efectos e.s. con una  $p \leq 0.01$  y  $p \leq 0.05$ , respectivamente;

n.s. indica que no existen diferencias e.s. La desviación estándar está expresada como la raíz cuadrada del cuadrado medio residual.

De los resultados que se recogen en la figura 1 se observa que para la dosis de riego D1 se produjo un aumento de la producción al aumentar el contenido en nitratos, lo que indicaría que, con ese volumen de riego, una solución con una mayor concentración de nitratos que la solución S3, podría haber dado lugar a una cosecha más abundante. En el caso de la dosis más alta (D2), la solución S3 ya excedía el aporte de nitratos óptimo para obtener la máxima cosecha.



**Figura 1.** Producción total (g-planta<sup>-1</sup>) para la dosis D1 y D2 frente a la concentración de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> aportada.

Las características cualitativas de los frutos no se vieron afectadas por el efecto de las soluciones nutritivas o las dosis de riego (Tabla 4).

**Tabla 4.** Parámetros cualitativos de los frutos

	Firmeza (g)	°Brix	Acidez	Índice madurez
<b>Solución</b>				
S1	278.3 -	16.96 -	1.87 -	9.13 -
S2	280.4 -	16.26 -	1.88 -	8.68 -
S3	271.4 -	16.16 -	1.75 -	9.15 -
<b>Dosis de riego</b>				
D1	281.4 -	16.64 -	1.87 -	8.91 -
D2	272.0 -	16.28 -	1.80 -	9.07 -
<b>Resumen ANOVA (g.l.)</b>				<b>%Suma de cuadrados</b>
<b>Factor</b>				
Solución (2)	6.3 ns	12.1 ns	28.8 ns	11.8 ns
Dosis (1)	9.4 ns	3.2 ns	9.1 ns	1.5 ns
<b>Interacción</b>				
Sol x Dosis (2)	19.8 ns	0.6 ns	1.5 ns	1.4 ns
Residual (12)	64.5	84.1	60.6	85.2
Desv. estándar	15.1	1.1	0.1	0.7

Letras diferentes indican diferencias e.s. p≤0.05; \* y \*\* indican efectos e.s. con una p≤0.01 y p≤0.05, respectivamente; n.s. indica que no existen diferencias e.s. La desviación

estándar está expresada como la raíz cuadrada del cuadrado medio residual.

Las soluciones nutritivas que aportaban más cantidad de nitratos (S2 y S3) dieron lugar a un mayor desarrollo vegetativo ( $p \leq 0.05$ ), que se puso de manifiesto en una mayor altura de las plantas ( $p \leq 0.05$ ), así como por un incremento del peso seco de la parte aérea ( $p \leq 0.05$ ) (Tabla 5). Entre las soluciones nutritivas, la S2 y S3 presentaron la mayor eficiencia de riego ( $p \leq 0.05$ ), en tanto que el empleo de la dosis de riego más alta (D2) disminuyó la eficiencia respecto a la dosis D1 ( $p \leq 0.05$ ) (Tabla 5).

**Tabla 5.** Parámetros de crecimiento vegetativo y riego

	Altura (cm)	Diámetro tallo (mm)	PS parte aérea (g)	Eficiencia de riego (Kg/m <sup>3</sup> )
<b>Solución</b>				
S1	167.3 b	10.97 -	512.4 b	0.911 b
S2	202.9 a	11.94 -	798.6 ab	1.961 a
S3	192.9 a	12.17 -	1063.9 a	1.799 a
<b>Dosis de riego</b>				
D1	169.0 b	11.59 -	612.7 b	1.829 a
D2	206.5 a	11.80 -	970.6 a	1.285 b
<b>Resumen ANOVA (g.l.)</b>			<b>%Suma de cuadrados</b>	
<b>Factor</b>				
Solución (2)	28.0*	9.0 ns	39.5**	33.6**
Dosis (1)	40.9**	0.4 ns	27.3**	11.7*
<b>Interacción</b>				
Sol x Dosis (2)	3.2 ns	24.3 ns	3.8 ns	34.2**
Residual (12)	15.8	65.3	17.9	20.5
Desv. estándar	14.7	1.7	183.5	0.4

Letras diferentes indican diferencias e.s.  $p \leq 0.05$ ; \* y \*\* indican efectos e.s. con una  $p \leq 0.01$  y  $p \leq 0.05$ , respectivamente; n.s. indica que no existen diferencias e.s. La desviación estándar está expresada como la raíz cuadrada del cuadrado medio residual.

Los resultados obtenidos pusieron de manifiesto que la solución con un contenido intermedio de nitratos (S2= 12.41 mmol/L) mejoró la producción obtenida con la solución de menor concentración (S1= 7.91 mmol/L), mientras que la solución S3 (16.91 mmol/L), con la mayor concentración de este anión, no consiguió mejorar la producción de la S2, alcanzando un valor algo inferior. Estos resultados coinciden con los obtenidos en ensayos realizados con pimiento, en el que la producción más elevada se logró con concentraciones de nitratos en la solución nutritiva de 9 mmol/L, ocasionándose descensos en la cosecha con concentraciones superiores (Bat-Tal et al, 2001 a). En cultivo de pepino dulce, cantidades de nitratos superiores a los 8 mmol/L tampoco llevaron asociada ninguna mejora productiva (Torres, 2001), lo que pone de manifiesto la gran complejidad que implica establecer el abonado nitrogenado óptimo para un cultivo, ya que los factores ambientales, la fase de desarrollo en la que se encuentra la planta, e incluso, el comportamiento varietal, pueden inducir respuestas no deseadas. Uno de los riegos de llevar a cabo un abonado con nitrógeno excesivo, es que se puede inducir en las plantas un crecimiento exuberante, que actuaría en detrimento de la producción. Los datos de los parámetros vegetativos obtenidos al final del cultivo indicaron que al aumentar la concentración de nitratos en la solución nutritiva se produjo un incremento del peso seco de la parte aérea, lo cual podría explicar por qué la solución con más nitratos no sólo no aumentó la producción, sino que, incluso, llegó a disminuirla. Las soluciones nutritivas influyeron sobre la cosecha a través del número de frutos obtenido, ya que el peso medio de los mismos no presentó variaciones al final del experimento (Dato no mostrado).

Tal y como se ha constatado en otros cultivos hortícolas como el tomate (Pascual et al., 2000; Ortega-Farías et al., 2001; Ortega-Farías et al., 2003) y melón (Ribas et al., 2003; San Bautista et al., 2004 b), el aumento de la dosis de riego, indujo en las plantas de *Physalis*, al final del cultivo, un incremento de la producción. Es habitual que el incremento de la producción obtenido al aumentar la dosis de riego se produzca como consecuencia de la obtención de frutos con un mayor peso medio, tal y como se ha constatado en experiencias con tomate (Pascual et al., 2000; San Bautista et al., 2004 a) o melón (Ribas et al., 2003; San Bautista et al., 2004 b; Cabello et al., 2009), sin embargo, en la actual experiencia, el incremento en la producción, fue consecuencia del aumento del número de frutos obtenido, pero no del peso medio.

A priori, existen dos importantes factores, como la C.E. (Conductividad Eléctrica) de las soluciones nutritivas y la influencia de los nitratos en el desarrollo vegetativo de las plantas, a través de los cuales, las soluciones nutritivas podrían incidir en la aparición de "cracking" en los frutos. En lo que respecta al primer factor, el empleo de soluciones con una C.E. más alta puede producir la disminución de rajado en los frutos como consecuencia del descenso del potencial hídrico (baja el potencial osmótico) que restringiría la entrada de agua en el fruto, tal y como se ha recogido en experimentos llevados a cabo en tomate (Chrétien et al., 2000). Posiblemente, las diferencias de C.E. existentes entre las distintas soluciones nutritivas empleadas no permitieron ejercer una influencia clara sobre la aparición de esta fisiopatía. Por otra parte, un exceso de nitratos puede provocar la formación de una masa foliar exuberante y un bajo número de frutos, causando un desequilibrio en la planta que disminuiría la competencia por los fotoasimilados, los cuales ejercerían una mayor presión en el interior de los frutos, haciéndolos más susceptibles al rajado. En el presente experimento, el incremento en peso de la parte aérea asociado al aumento de nitratos en las soluciones no implicó una mayor incidencia de rajado, ya que no se encontraron diferencias significativas en los porcentajes de frutos afectados para las soluciones nutritivas y dosis de riego.

En cuanto al riego, la aportación de una dosis más alta, provocaría un incremento del potencial hídrico que facilitaría la entrada de agua en el fruto haciéndolo más susceptible al "cracking", tal y como se recoge en experimentos realizados con *Physalis* (Gordillo et al., 2004) y tomate (Peet y Willits, 1995; Ortega-Farías et al., 2003). En el actual experimento esta circunstancia no ha podido ser constatada. Por su parte, el mayor desarrollo vegetativo provocado por la dosis D2 tampoco incidió decisivamente en una disminución del rajado. Se ha constatado un incremento de la altura de las plantas al aumentar la dosis de riego, lo cual coincide con lo obtenido por San Bautista et al. (2004 a) para tomate.

Las mayores eficiencias de riego se lograron con las soluciones S2 y S3, ya que el incremento en la concentración de nitratos hace que, en igualdad de dosis de riego, se obtenga una mayor producción. También se observa que el aumento de concentración de la solución S3 respecto a la S2, no indujo mejora en la eficiencia.

En cuanto a las dosis de riego, la más baja (D1) produjo una mayor eficiencia, posiblemente debido a que con la dosis D2 se produjo un crecimiento vegetativo excesivo que actuó en detrimento de la cosecha, lo cual coincide con lo obtenido en experimentos llevados a cabo con pimiento (Mohamed Yahadih Ahmed, 2005).

#### **4. Conclusiones**

La solución S2 y la dosis D2 fueron las que dieron las mejores respuestas productivas.

También se determinó que con la dosis D1, el incremento de nitratos de las soluciones aumentó la cosecha obtenida, mientras que para la dosis D2, la solución con mayor contenido en nitratos redujo la producción.

La mayor cosecha obtenida con las soluciones S2 y la dosis D2 se debió al mayor número de frutos formado, ya que ninguna de ellas afectó al peso medio de los frutos.



Las soluciones nutritivas y dosis de riego empleadas no ejercieron una influencia clara en la aparición de rajado en los frutos.

Las soluciones S2 y S3 y la dosis D2 dieron las plantas con un mayor peso seco de la parte aérea y con una mayor altura.

Las soluciones nutritivas y las dosis de riego no ejercieron una influencia clara en las características cualitativas de los frutos.

Las mayores eficiencias de riego se consiguieron con las soluciones S2 y S3 y con la dosis de riego más baja (D1).

## 5. Bibliografía

- Baixauli, C. y Aguilar, J.M. (2002). Cultivo sin suelo de hortalizas: aspectos prácticos y experiencias. *Divulgación Técnica*: 53. Generalitat Valenciana Conselleria d'Agricultura, Peixca i Alimentació. España. 110 p.
- Bar-Tal, A., Aloni, B., Karni, L. y Rosenberg, R. (2001). Nitrogen nutrition of greenhouse pepper. II. Effects of nitrogen concentration and NO<sub>3</sub>:NH<sub>4</sub> ratio on yield, fruit Shape and the incidence of blossom-end rot in relation to plant mineral composition. *Hortscience*. 36 (7): 1252-1259
- Cabello, M.J., Castellanos, M.T., Romojaro, F., Martínez-Madrid, C. y Ribas, F. (2009). Yield and quality of melon grown under different irrigation and nitrogen rates. *Agricultural Water Management*. 96 (5): 866-874
- Chrétien, S. and Gosselin, A. (2000). High Electrical Conductivity and Radiation-based Water Management Improve Fruit Quality of Greenhouse Tomatoes Grown in Rockwool. *Hortscience* 35(4):627–631.
- Fischer, G. 2005. El problema del rajado del fruto de uchuva y su posible control. En: *Avances en cultivo, poscosecha y exportación de la uchuva (Physalis peruviana L.) en Colombia*. Eds G. Fischer, W. Piedrahita, D. Miranda. J. Romero. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de agronomía. Bogotá. pp 55-82
- Gordillo, O.P., Fischer, G y Guerrero, R. (2004). Efecto del riego y de la fertilización sobre la incidencia del rajado en frutos de uchuva (*Physalis peruviana L.*) en la zona de Silvana (Cundinamarca). *Agronomía Colombiana* 22 (1): 53-62
- Kamimura, S., Yoshikawa, H. Ito and K. Ito. 1972. Studies on fruit cracking in tomatoes. *Bulletin of the Horticultural research station of the Ministry of Agriculture and Forestry* N° 7, Serie C. Morioka.
- Malorgio F., Pardossi A., Tognoni F., Bertolacci M., Casarotti D., Martignon G y Schiavi M. (1991). Controllo del consumo idrico nella coltivazione senza suolo del pomodoro. *Colture protette*, 8/9: 123-127.
- Maroto, J.V.(2002). *Horticultura Herbácea Especial*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid 702 pp.
- Maroto, J.V. (2008). *Elementos de Horticultura General*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. 475 pp.
- Mitchell, J.P., Shennan, C., Grattan, S.R. y May, D.M. (1991). Tomato fruit yields and quality under water deficit and salinity. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 116 (2): 215-221
- Mohamed Yahadih Ahmed. (2005). Influencia de diversas técnicas hortícolas en los parámetros productivos (cuantitativos y cualitativos) y el comportamiento agronómico del cultivo forzado de pimiento (*Capsicum annuum L.*). Tesis doctoral E.T.S.I.A. U.P.V.
- Ortega-Farías, S., Márquez, J., Valdés, H. y Paillán, J.H. (2001). Efecto de cuatro láminas de agua sobre el rendimiento y calidad de tomates (*Lycopersicon esculentum Mill. cv. FA-144*) de invernadero producido en otoño. *Agricultura Técnica* 61 (4): 479-487.
- Ortega-Farías, S., Leyton, B, Valdés, H y Paillán, H. (2003). Efecto de cuatro láminas de agua sobre el rendimiento y calidad de tomates de invernadero producido en primavera-verano. *Agricultura Técnica (Chile)* 63 (4): 394-402



- Pascual, B., Maroto, J.V., San Bautista, A., López-Galarza y Alagarda, J. (2000). Influence of watering on the yield and cracking of cherry, fresh-market and processing tomatoes. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology* 75 (2): 171-175
- Peet, M.M. y Willits, D.H. (1995). Role of excess water in tomato fruit cracking. *HortScience* 30:65-68
- Ribas, F., Cabello, M. J., Moreno, M. M., Moreno, A. y López-Bellido, L. (2001). Influencia del riego y de la aplicación de potasio en la producción del melón (*Cucumis melo* L.). I: Rendimiento. *Invest. Ag: Prod. Prot. Veg.* 16 (2): 283-297
- Ribas, F., Cabello, M. J., Moreno, M. M., Moreno, A. y López-Bellido, L. (2003). Influencia del riego y de la aplicación de potasio en la producción del melón (*Cucumis melo* L.) II. Calidad. *Spanish journal of agricultural research*, 1 (1): 79-90
- San Bautista, A., López-Galarza, S., Pascual, B., Alagarda, J., Bono, M., Palau, V., Laza, P. y Maroto, J.V. (2004 a). Producción e incidencia de fisiopatías como respuesta a diferentes dosis de riego y soluciones nutritivas en dos cvs de tomate bajo invernadero. *Cuadernos de fitopatología* 3<sup>er</sup> trimestre 85-93
- San Bautista, A., López-Galarza, S., Torres, J., Bono, M.S., Laza, P., Palau, V., Solís, G., Pascual, B., Alagarda, J. y Maroto, J.V. (2004 b). Efecto de diversas dosis de riego sobre la producción, calidad, incidencia de fisiopatías, y parámetros del desarrollo en cultivo protegido de melón. *Agrícola vergel: Fruticultura, horticultura, floricultura*. Año 23; 275: 562-569
- Torres, J.F. (2001). Influencia de diversas técnicas de cultivo sobre los principales parámetros productivos de varios clones de pepino dulce (*Solanum muricatum* Ait.). Trabajo Fin de Carrera. E.T.S.I.A. U.P.V.



## INFLUENCIA DE LA TEXTURA DEL SUELO EN LOS BULBOS HÚMEDOS DESARROLLADOS EN SUELO ENARENADO CON EMISORES DE RIEGO LOCALIZADO DE BAJO CAUDAL

*Zapata Sierra, A.J.(1) (P), Contreras París, J.I.(2), Martín Usero, F. (1), Baeza Cano, R. (2)*

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería, Universidad de Almería, Ctra. De Sacramento s/n, 04120 Almería.

[ajzapata@ual.es](mailto:ajzapata@ual.es)

<sup>2</sup>Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera de Andalucía (IFAPA), Centro La Mojonera, Camino San Nicolás, nº1, 04745 La Mojonera, Almería.

[rafaelj.baeza@juntadeandalucia.es](mailto:rafaelj.baeza@juntadeandalucia.es)

### Resumen

Se ha medido la distribución de la humedad en 20 suelos, en sistema enarenado en la comarca Campo de Dalías (Almería), regados por goteo y bajo cultivo de pimiento. Se utilizaron goteros de caudal  $3\text{l}\cdot\text{h}^{-1}$  con una densidad de 2 emisores. $\text{m}^{-2}$  y un tiempo de riego de 30 minutos. Se ha encontrado que existe una gran heterogeneidad en las propiedades físicas de los suelos a pesar de tratarse de suelos artificialmente aportados. El factor más importante para explicar las diferencias en la distribución de humedad fue la textura del suelo. De los ensayos se deduce que existen problemas en la distribución del riego debido a la presencia de horizontes impermeables. Por otra parte los niveles de humedad encontrados antes de los riegos sugieren que se está regando en exceso los suelos y que el área mojada alcanza a casi la totalidad de la superficie de cultivo.

### Abstract

We measured the moisture distribution in 20 soils under “arenado” system in the county Campo de Dalías (Almeria), drip irrigated and a pepper crop. Flow drippers  $3\text{l}\cdot\text{h}^{-1}$  were used with a density of 2 emitters. $\text{m}^{-2}$  and a run time of 30 minutes. It has been found that there is great heterogeneity in the physical properties of soils despite being artificially supplied ones. The most important factor in explaining differences in moisture distribution was the soil texture. Trials it appears that there are problems in the distribution of irrigation due to the presence of impermeable layers. Moreover moisture levels found prior to suggest that the soils are being watered excessively and the wet area reaches almost the entire culture surface.

### 1-Introducción y objetivos

La forma y dimensiones del volumen mojado o bulbo húmedo dependen, ante todo, de las propiedades y características del perfil físico del suelo, del volumen de agua aplicado, caudal del emisor, contenido de agua presente en el suelo al inicio de la irrigación y topografía del terreno (Lubana y Narda, 1998).

Según se recoge en la bibliografía, a medida que aumenta el caudal del emisor hay mayor predominio del desplazamiento horizontal respecto del vertical (Bresler, 1977). Para varios caudales y distintos suelos, el desplazamiento horizontal y vertical del frente de humedad crecen de forma más rápida al inicio del riego y de forma más atenuada a medida que aumenta el tiempo de aplicación. No obstante existe información contradictoria al respecto que indica que con emisores de ultrabajo caudal ( $< 1$  l/hora) hay un mayor

desplazamiento horizontal del frente humedecido cuando se comparan con emisores de mayor caudal.

En cualquier caso, el primer factor a considerar es el perfil físico del suelo o conjunto de propiedades físicas que intervienen en el movimiento del agua en este suelo, para cada uno de los horizontes o capas, pues el grado de estratificación que presenta el perfil es de gran importancia (Lubana y Narda, 2001). De las propiedades físicas del suelo, la textura es la más influyente en el movimiento del agua en el suelo (Fuentes, 1998) y su determinación en laboratorio es sencilla.

En los cultivos hortícolas del Sureste de España se ha extendido desde hace décadas un perfil característico de suelos: el enarenado, consistente en la aplicación de una capa de arena de unos 8-10 cm de espesor sobre otra de tierra fértil de cañada, también aportada, de un espesor variable: 20-40 cm (Lao y Jiménez, 2002).

La capa superficial de arena actúa como aislante del suelo, tanto térmico, como hídrico, evitando la evaporación directa desde el suelo e influyendo en el reparto de humedad en el mismo. Existen algunos trabajos en condiciones de laboratorio (i.e. Boswel, 1989; Keller y Bliesner, 2005), pero hasta la fecha, el bulbo húmedo en el perfil del suelo enarenado, utilizado mayoritariamente en los cultivos hortícolas de invernadero en la provincia de Almería, no ha sido determinado in situ.

El objetivo del presente trabajo ha sido caracterizar las dimensiones y la evolución del movimiento del agua en los bulbos húmedos generados en suelos enarenados de la comarca del Campo de Dalías con los habituales emisores de riego localizado de  $3 \text{ l}\cdot\text{h}^{-1}$  de caudal nominal. Adicionalmente el estudio permitirá caracterizar los suelos enarenados de la Comarca del Campo de Dalías.

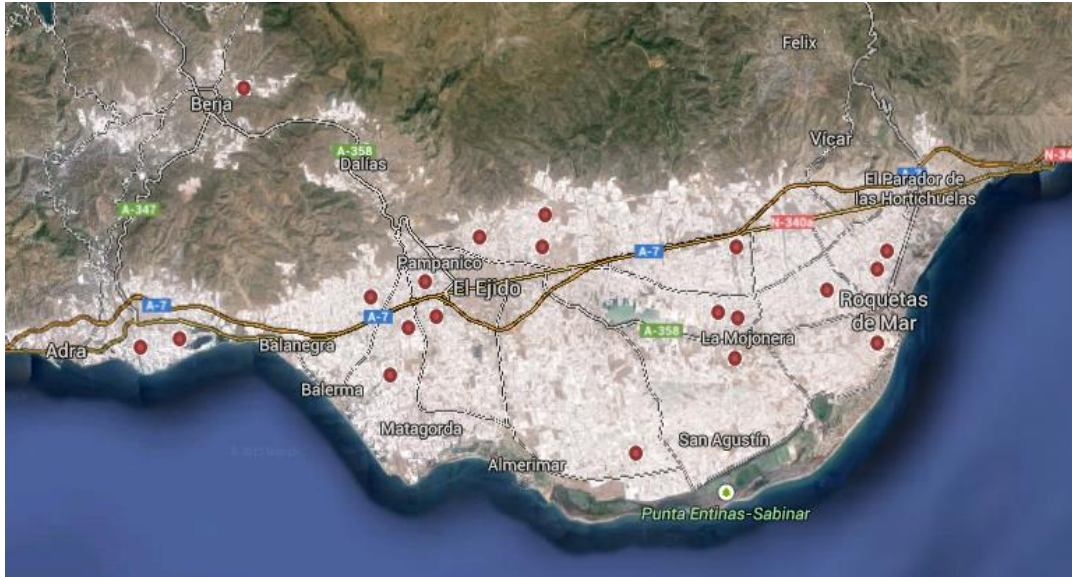
## 2- Material y Métodos

Se han seleccionado 20 fincas comerciales de cultivo de pimiento (cultivo mayoritario en la zona) que cumplieran con las siguientes premisas de partida:

- Suelo enarenado
- Emisores de caudal nominal:  $3 \text{ l}\cdot\text{h}^{-1}$
- Marco de riego: 2 emisores $\cdot\text{m}^{-2}$  (aproximadamente)
- Tiempo de riego (dotación): 30 minutos de aplicación
- Cultivo con más de un mes de desarrollo

La selección de las fincas se realizó de forma dirigida para poder obtener información de los principales suelos de la comarca.

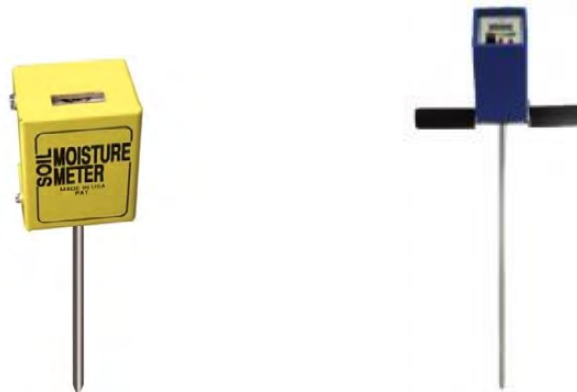
- Humedad inicial (previa al riego). Se midió la humedad en la línea perpendicular a los ramales de riego, coincidente con los puntos de emisión, en la línea perpendicular a los ramales, a  $\frac{1}{4}$  del punto de emisión (12,5 cm respecto al gotero) y en la línea perpendicular a los ramales, a  $\frac{1}{2}$  del punto de emisión (25 cm respecto al gotero). Se midió cada 20 cm en la horizontal y a tres profundidades: 10, 20 y 30 cm (variables dependiendo de la profundidad del suelo estudiado). Se realizaron en total 60-70 medidas por par de emisores (líneas de riego pareadas). Antes de realizar las medidas se apartó la capa de arena de la zona a muestrear y se calibraron los aparatos de medición en saturación y al aire.



*Figura 1 Distribución de los invernaderos muestreados.*

- Humedad final (tras el riego). Una vez finalizado el muestreo inicial se extendió de nuevo la arena y se realizó un riego de equivalente a 1,5 l (30 minutos en emisores 3 l·h<sup>-1</sup>). Al iniciar el riego se midió la presión en el ramal de medida para posteriormente calcular el caudal exacto que emiten los dos goteros de la zona de estudio. Trascorridos 5 minutos tras la finalización del riego se apartó de nuevo la arena y se iniciaron las medidas 10 minutos después (15 minutos tras el riego). Se midió en las mismas perpendiculares respecto a los ramales y a las mismas profundidades, en puntos equidistantes en la horizontal respecto a los puntos muestreados en la humedad inicial. De nuevo se realizaron un total de 60-70 medidas por par de emisores.

Los aparatos utilizados para realizar las mediciones en campo fueron: Medidor de humedad volumétrica *Digital Aquaterr-M350* y el medidor analógico *Spectrum Soil Moisture Tester*. La medida obtenida, fracción de saturación, es convertida a humedad volumétrica.



*Figura 2 Aparato de medida de humedad analógico Spectrum® SoilMoistureTester.y Aparato de medida de humedad digital Aquaterr® M-350*

Una vez finalizadas las mediciones en campo se extrajeron 5 cilindros de suelo para el análisis de humedad volumétrica en laboratorio. Las muestras se tomaron entre dos puntos de similar humedad medida "in situ". Para ello se eligieron 2 puntos de extracción de menor valor de humedad, dos puntos de extracción de mayor valor y un punto de valor intermedio. La humedad medida en laboratorio nos permitirá ajustar las escalas de humedad de los aparatos.



- Textura y pedregosidad. Una vez finalizada la medición de humedad volumétrica se mezclaron las muestras de los 5 cilindros y se tomó una muestra para el análisis de textura y pedregosidad en laboratorio.

- Caudal de los emisores. Concluidas las mediciones y toma de muestras en campo se determinó el caudal exacto de los dos emisores evaluados en banco de ensayo.

### Análisis estadístico

Los datos fueron analizados estadísticamente mediante un análisis de la varianza factorial (ANOVA), atendiendo a un diseño factorial con cuatro factores y estudiando la interacción entre ellos. Los datos en porcentaje fueron transformados mediante la función  $1/\sqrt{\text{seno}}$  para obtener una distribución normal. Cuando el análisis de la varianza fue significativo, se aplicó el test de comparación de medias de mínima diferencia significativa (LSD para  $P \leq 0,05$ ;  $P \leq 0,01$ ;  $P \leq 0,001$ ) para identificar las diferencias entre valores medios. El análisis estadístico fue realizado con el programa Statgraphics Plus v. 5.1 (Statgraphics, Warrenton, Va.).

## 3- Resultados y conclusiones

### 3.1. Caracterización de los suelos estudiados

Todos los suelos estudiados tienen como nexo de unión el sistema enarenado, sin embargo existen importantes diferencias físicas entre los mismos en aspectos como la textura, profundidad y capacidad de drenaje.

Tabla 1 Características de los suelos muestreados

Localización	Textura	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Grava (%)
Invernadero 1	Franco-arenoso	73,8	13,8	12,5	47,1
Invernadero 2	Franco-arcillo-arenoso	62,5	13,8	23,8	24,2
Invernadero 3	Franco-arcillo-arenoso	68,8	11,3	20,0	19,0
Invernadero 4	Franco-arcillo-arenoso	65,0	12,5	22,5	48,7
Invernadero 5	Franco-arenoso	66,3	20,0	13,8	9,3
Invernadero 6	Arenoso-franco	83,8	7,5	8,8	42,6
Invernadero 7	Franco-arcillo-arenoso	51,3	17,5	31,3	21,4
Invernadero 8	Franco-arcilloso	43,8	25,0	31,3	4,3
Invernadero 9	Franco-arcillo-arenoso	68,8	6,3	25,0	3,4
Invernadero 10	Arenoso-franco	83,8	3,8	12,5	18,1
Invernadero 11	Franco-arcilloso	33,8	32,5	33,8	14,1
Invernadero 12	Franco-arcillo-arenoso	52,5	18,8	28,8	30,4
Invernadero 13	Franco-arenoso	65,0	17,5	17,5	16,3
Invernadero 14	Arcilloso	30,0	23,8	46,3	38,4
Invernadero 15	Franco-arcilloso	40,0	31,3	28,8	28,2
Invernadero 16	Arenoso-franco	80,0	11,3	8,8	38,3
Invernadero 17	Arcilloso	27,5	20,0	52,5	10,9
Invernadero 18	Arcilloso	20,0	30,0	50,0	2,1
Invernadero 19	Franco-arcillo-arenoso	76,3	7,5	16,3	11,3
Invernadero 20	Franco-arcillo-arenoso	57,5	18,8	23,8	12,9



Tanto la textura como el porcentaje de grava se refieren al horizonte de tierra aportada o no que subyace bajo la capa de arena y la de materia orgánica que conforman el suelo enarenado.

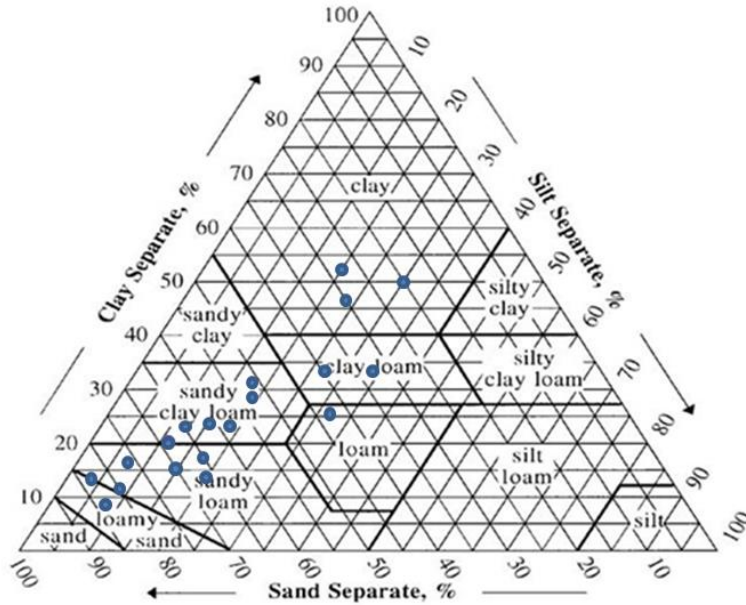


Figura 3 Diagrama triangular de texturas de los suelos analizados

### 3.2. Bulbos húmedos generados

Un 30 % de los suelos estudiados mostraban niveles de humedad muy elevados antes de iniciar el riego y el incremento de humedad en los mismos tras aplicar el mismo es mínimo, lo que indica que se está regando en exceso. En este sentido se puede ver la Figura 4.

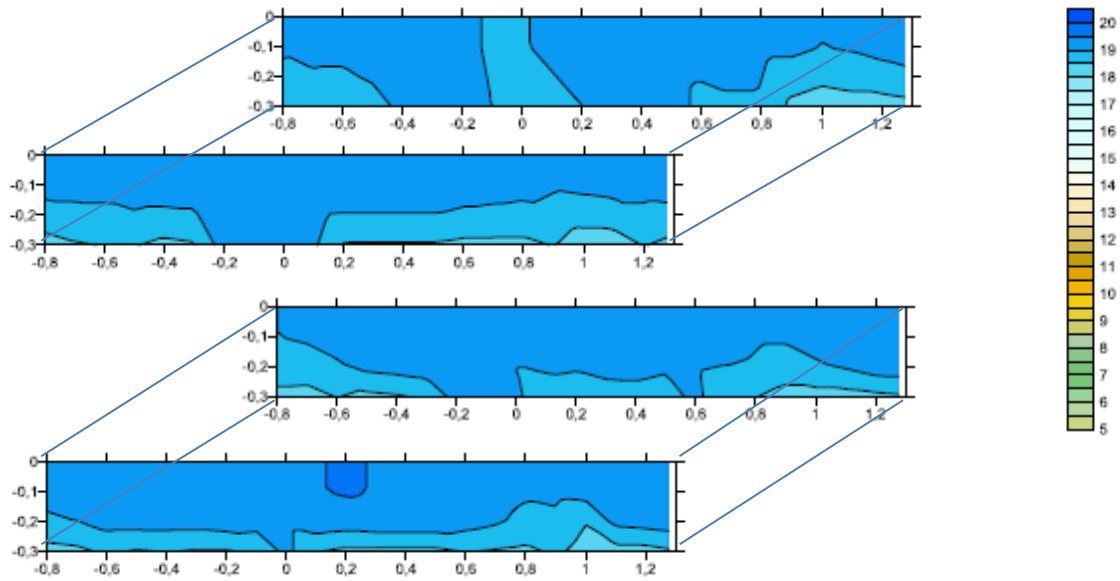


Figura 4 Perfil de distribución de la humedad en el suelo del Invernadero 1, antes (arriba) y después de la operación de riego (abajo). Se muestra al fondo el perfil en la línea del gotero y delante el perfil de la línea media entre goteros

Antes de aplicar el pulso de riego, la mayor parte de los suelos evaluados presentan los niveles de humedad más bajos en la zona más cercana al emisor, coincidente con la zona de mayor concentración radicular. Se presenta la Figura 5 para mostrar este caso.

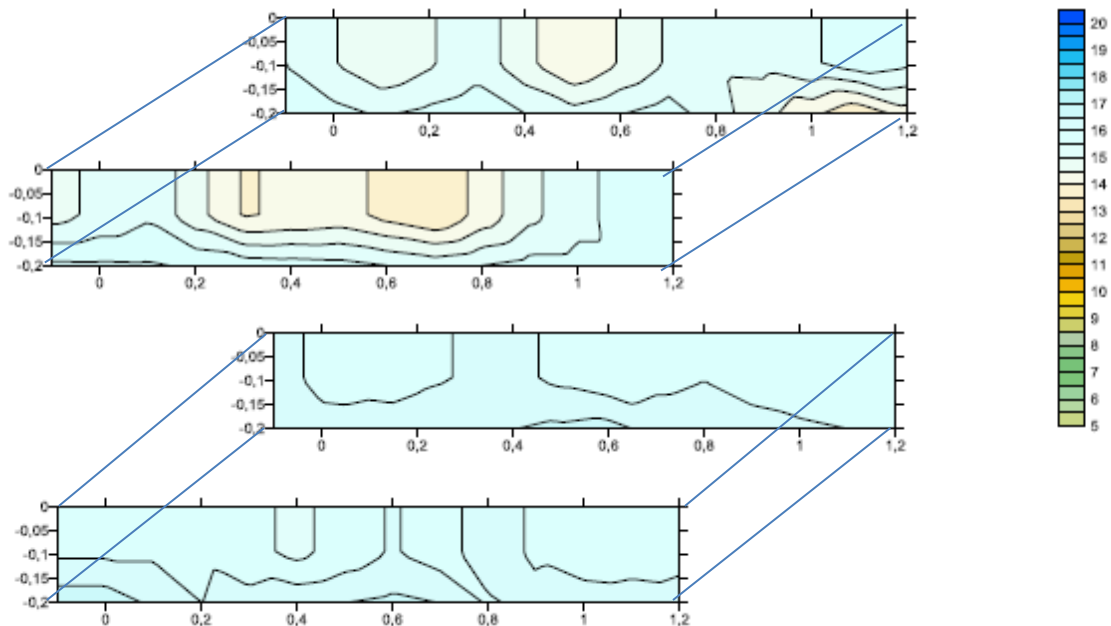


Figura 5 Perfil de distribución de la humedad en el suelo del Invernadero 11, antes (arriba) y después de la operación de riego (abajo). Se muestra al fondo el perfil en la línea del gotero y delante el perfil de la línea media entre goteros

Alguno de los suelos evaluados muestra niveles de humedad más elevados en la capa inferior del suelo, lo que denota la presencia de capas inferiores impermeables, muy frecuentes en la comarca. Para ilustrar este caso se muestra la Figura 6.

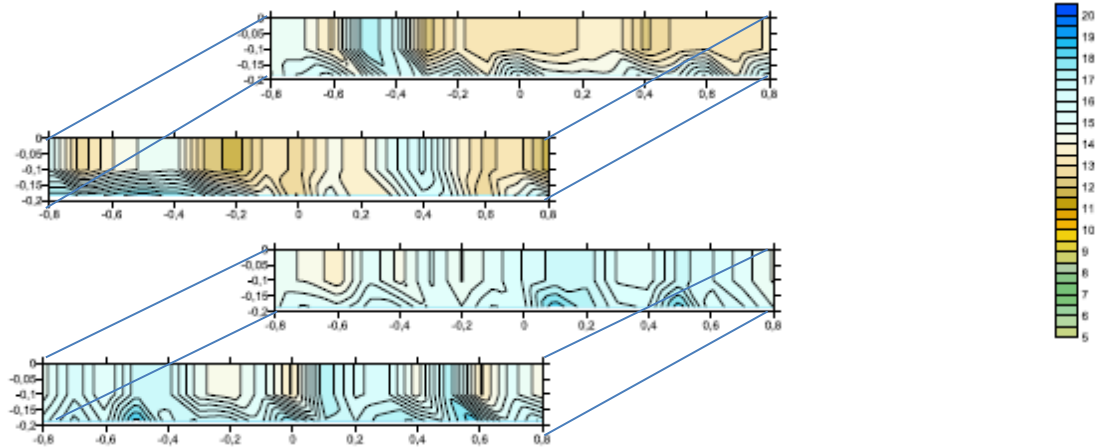


Figura 6 Perfil de distribución de la humedad en el suelo del Invernadero 8, antes (arriba) y después de la operación de riego (abajo). Se muestra al fondo el perfil en la línea del gotero y delante el perfil de la línea media entre goteros.

En la mayor parte de los suelos la distribución de humedad en la horizontal es uniforme, tanto en la línea de emisión como en la perpendicular a la misma. En estos casos el marco de riego y caudal de riego consigue el solape entre emisores de la misma línea y entre líneas adyacentes. Se puede concluir que se riega en toda la superficie del suelo. Únicamente en los suelos con porcentajes de arcilla inferiores al 15% se aprecian zonas del terreno no humectadas. En este sentido se ofrece la Figura 7.

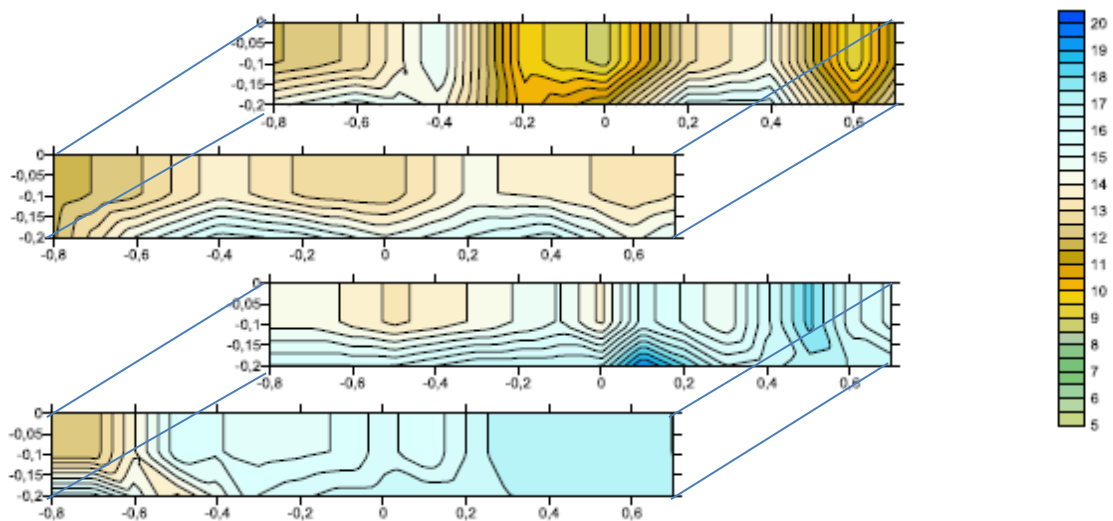


Figura 7 Perfil de distribución de la humedad en el suelo del Invernadero 14, antes (arriba) y después de la operación de riego (abajo). Se muestra al fondo el perfil en la línea del gotero y delante el perfil de la línea media entre goteros

### 3.3. Efecto de los factores estudiados en el nivel de humedad del suelo

El análisis factorial mostró que la textura es el factor de mayor influencia en el nivel de humedad del suelo, tanto antes del riego como después, afectando también el incremento de humedad tras el riego (Tabla 2).

Antes del riego, los suelos arcillosos (arcilloso y franco-arcilloso) fueron los que mayor nivel de humedad volumétrica presentaban, con valores medios de 15,5% en el perfil del suelo. Los que menor porcentaje de humedad volumétrica presentaron fueron los suelos arenoso-francos con un valor de 10,1%. Después del riego, aunque los valores de humedad fueron mayores, el efecto de la textura siguió siendo el mismo (Tabla 3).

El nivel de humedad volumétrica también se vio afectado por la profundidad, tanto antes como después del riego (Tabla 2). Antes del riego, la mayor humedad se detectaba a mayor profundidad (-30cm) y la menor a -10 cm (Tabla 4) con valores medios de 13,5%. Después del riego estas diferencias se atenúan (Tabla 4).

El análisis estadístico reveló interacciones en el incremento de humedad entre la textura y la profundidad del suelo, y entre la textura y la línea del suelo medida (Tabla 2). La interacción entre la textura y la profundidad del suelo se muestra en la Figura 8. En los suelos arcillosos no existieron diferencias en el incremento de humedad del suelo en profundidad, presentando tanto a 10, 20 y 30 cm unos valores muy similares sin diferencias estadísticamente significativas (Figura 8), igual sucede en los suelos francos (franco-arcillosos, franco-arcillo-arenosos y franco-arenosos). En suelos de textura arenosa-franca se muestran diferencias significativas entre los niveles de humedad registrados a 10, 20 y 30 cm de profundidad, presentando a 10 cm el mayor incremento de humedad (Figura 8).

Tabla 2 Nivel de significación de los factores estudiados e interacciones entre factores. Incremento de humedad registrado tras el riego

Factor	Humedad del suelo		
	Antes del riego	Después del riego	Incremento <sup>1</sup>
A: Textura	***	***	***
B: Profundidad	***	*	ns
C: Línea	ns	ns	ns
D: Distancia a gotero	ns	ns	ns
<b>Interacción</b>			
AB	ns	ns	***
AC	ns	ns	*
AD	ns	ns	ns
BC	ns	ns	ns
BD	ns	ns	ns
CD	ns	ns	ns
ABC	ns	ns	*
ABD	ns	ns	ns
ACD	ns	ns	ns
BCD	ns	ns	ns

ns, no significativo. \*Significativo para  $P < 0.05$ .  
 \*\*Significativo para  $P < 0.01$ . \*\*\*Significativo para  $P < 0.001$ .

Tabla 3 Efecto de la textura del suelo en el porcentaje de humedad volumétrica. ARE-F: Arenoso-franco; F-ARC-ARE: Franco-arcillo-arenoso; F-ARE: Franco-arenoso; F-ARC: Franco-arcilloso; ARC: Arcilloso. Incremento de humedad registrado tras el riego

	Humedad del suelo (%)		
	Antes del riego	Después del riego	Incremento <sup>1</sup>

	***	***	***
ARE-F	10,13d	11,24d	1,12a
F-ARC-ARE	13,66c	14,39c	0,73b
F-ARE	14,69b	14,98b	0,30c
F-ARC	15,57a	16,24a	0,68bc
ARC	15,52a	16,43a	0,91ab

ns, no significativo                      \*Significativo para  $P < 0.05$ .  
 \*\*Significativo para  $P < 0.01$ .        \*\*\*Significativo para  $P < 0.001$ .

Tabla 4 Efecto de la profundidad del suelo en el porcentaje de humedad volumétrica. Incremento de humedad registrado tras el riego

	Humedad del suelo (%)		
	Antes del riego	Después del riego	Incremento <sup>1</sup>
	***	*	ns
-10 cm	13,52c	14,43b	0,91
-20 cm	13,88b	14,64ab	0,77
-30 cm	14,34a	14,90a	0,56

ns, no significativo.,                      \*Significativo para  $P < 0.05$ .  
 \*\*Significativo para  $P < 0.01$ .,        \*\*\*Significativo para  $P < 0.001$ .

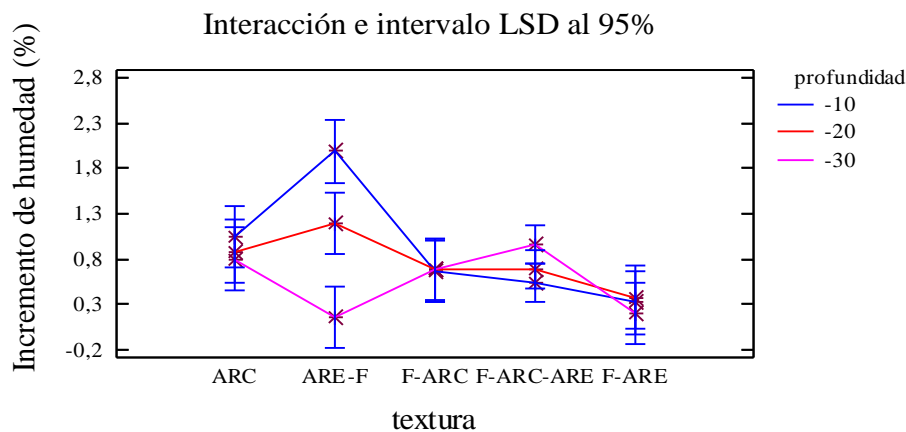


Figura 8. Interacción entre la textura y la profundidad del suelo en el incremento del porcentaje de humedad volumétrica.

En lo que respecta a la interacción existente entre la textura y la línea del muestreo (Figura 9), en suelos arcillosos se mostró un incremento del nivel de humedad mayor en la línea del gotero, con respecto a la línea intermedia. Sin embargo, en suelos francos (franco-arenosos, franco-arcillo-arenosos y franco-arcillosos) no se muestran diferencias en el incremento de humedad del suelo asociadas a la línea de muestreo (Figura 9).

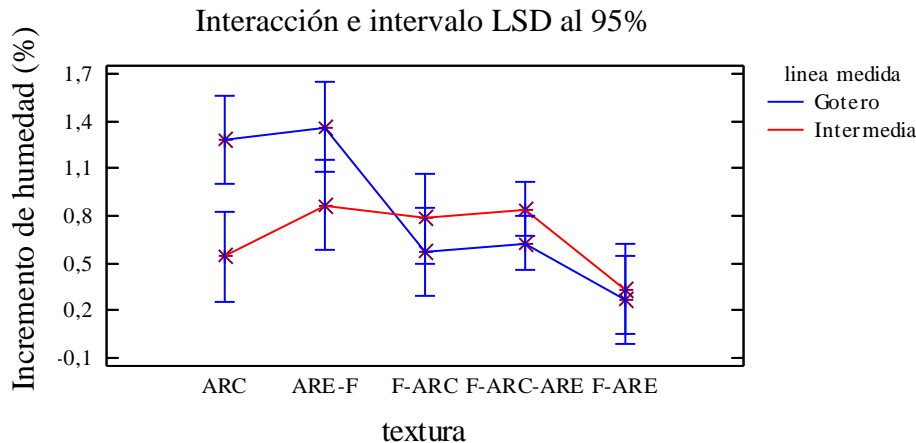


Figura 9. Interacción entre la textura y la línea de medida del suelo en el incremento del porcentaje de humedad volumétrica.

### Conclusiones

A pesar de que los suelos estudiados tienen como nexo de unión el sistema enarenado, existen importantes diferencias físicas entre los mismos en aspectos como la textura, profundidad y capacidad de drenaje.

Los datos recogidos muestran que en muchas explotaciones se está regando en exceso.

La mayor parte de los suelos evaluados presentan los niveles de humedad más bajos en la zona más cercana al emisor, coincidente con la zona de mayor concentración radicular.

Algunos de los suelos evaluados muestran niveles de humedad más elevados en la capa inferior del suelo, lo que denota la presencia de capas inferiores impermeables, muy frecuentes en la comarca.

Los datos revelan que en la mayor parte de los casos se riega en toda la superficie del suelo. Únicamente en los suelos con porcentajes de arcilla inferiores al 15% se aprecian zonas del terreno no humectadas.

### Agradecimientos

El trabajo ha sido cofinanciado por Fondos Europeos (FSE y FEDER) y la Consejería de Agricultura y Pesca (IFAPA Junta de Andalucía) mediante el Proyecto TRANSFORMA-CONECTA-SAR. (PP.TRA.TRA201300.10)

### 4 Bibliografía y referencias

- Boswel, M.J. 1989. Manual de diseño y manejo de los sistemas de micro-irrigación, James Hardie Irrigation (Iberia), Sevilla. España.
- Bresler E , 1977. Trickle-drip irrigation: principles and application to soil water management. *Advances in Agronomy*, 29, 343-393
- Fuentes, Luis., 1998. Técnicas de Riego. 3ª ed. Madrid, España. Ediciones Mundi-Prensa. 515 p.
- Keller, J y R.D. Blisner., 2005. Sprinkle and tickle irrigation, Van Nostrand Reynhold, New York. USA.





- Lao, M.T., Jimenez, S., 2002, Los suelos enarenados en el sureste español. *Vida Rural* 159, 42-44
- Lubana, P.P.S., N.K. Narda, 1998, Soil water dynamics model for trickle irrigated tomatoes. *Agricultural Water Management* 37 145-161
- Lubana, P.P.S., N.K. Narda, 2001, Modelling Soil Water Dynamics under Trickle Emitters - a Review. *J. agric. Engng Res.* 78 (3), 217-232



## COMPARACIÓN ENTRE LA PROPUESTA GENERADAS POR EL MODELO DE SIMULACION DE RIEGO OPTIMIZADO CON UN RIEGO CONSTANTE EN CULTIVO DE ZANAHORIA EN BRASIL

Conceição, B.C.L.<sup>1</sup>, Carvalho, D.F.<sup>2</sup>, Domínguez, A.<sup>3</sup>, Tarjuelo, J.M.<sup>4</sup>, Martínez-Romero, A.<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Ingeniero Agrónomo, Investigador; <sup>2</sup> Dr. Ingeniero Agrícola, Profesor, Departamento de Ingeniería, Universidad Federal de Rio de Janeiro, BR 465, km 7, 23890-000 Seropédica-RJ (Brasil) Barrow, [carvalho@ufrj.br](mailto:carvalho@ufrj.br);

<sup>3</sup> Dr. Ingeniero Agrónomo, Profesor Contratado Doctor; <sup>4</sup> Dr. Ingeniero Agrónomo, Catedrático de Universidad. <sup>5</sup> Dr. Ingeniero Agrónomo, Investigador; Centro Regional de Estudios del Agua (CREA), Universidad de Castilla-La Mancha, Ctra. de Las Peñas km. 3.2, 02071 Albacete, [brunojlellismaria@yahoo.com.br](mailto:brunojlellismaria@yahoo.com.br); [alfonso.dominguez@uclm.es](mailto:alfonso.dominguez@uclm.es); [jose.tarjuelo@uclm.es](mailto:jose.tarjuelo@uclm.es); [angel.mromero@uclm.es](mailto:angel.mromero@uclm.es);

### Resumen

Los modelos de simulación de cultivos son utilizados como herramientas de ayuda a la gestión de los recursos disponibles. Para el cultivo de la zanahoria, pocos trabajos han estudiado el efecto del riego deficitario sobre su rendimiento y la calidad de las cosechas. La metodología ORDI (optimized regulated deficit irrigation), integrada en el modelo MOPECO, optimiza la distribución del agua disponible para riego a lo largo del ciclo de un cultivo bajo condiciones de déficit. El estudio se realizó en un área experimental de SIPA - Integrado de Producción Agroecológica, que se encuentra en Seropédica-RJ, Brasil. El sistema de riego utilizado fue localizado por goteo, con un ramal por cada dos líneas de cultivo y un espaciamiento entre emisores de 10 cm, aportando un caudal de 4 litros metro<sup>-1</sup>. Se evaluaron dos métodos de aplicación de riego deficitario, los llamados: CDI (nivel de déficit constante de agua) y ORDI (nivel de déficit variable optimizado por etapas). Para ambos métodos se aplicaron 6 relaciones ETa/ETm globales objetivo (1,0, 0,9, 0,8, 0,7, 0,6 y sin riego). En los dos años de ensayo no aparecieron diferencias estadísticamente significativas entre los rendimientos totales cuando se compararon las metodologías ORDI y CDI, para el mismo nivel de déficit. Sin embargo, un alto porcentaje de las raíces obtenidas con la estrategia CDI presentaron deficiencias en términos de calidad (malformaciones, tamaños inadecuados, grietas, etc) que ocasionaron una disminución del rendimiento comercial. En consecuencia, para un mismo volumen de agua de riego aplicado, la distribución del riego propuesta por ORDI fue más eficiente en términos de rendimiento comercial (llegando al 50% en el tratamiento 0,6 y de alrededor del 24% para el resto de tratamientos).

### 1) Introducción.

Actualmente, el uso eficiente y racional de los recursos hídricos es una prioridad del sector agrario (FAO, 2009). Los modelos de simulación de cultivos están siendo utilizados como herramientas de ayuda a la gestión de los recursos disponibles, mejorando la productividad con el consiguiente ahorro de costes (STEWART et al., 1977). Para el cultivo de la zanahoria, son pocos los trabajos que han estudiado el efecto del riego deficitario sobre su rendimiento y la calidad de las cosechas. La metodología ORDI (optimized regulated deficit irrigation) (Domínguez et al., 2012) optimiza la distribución del agua

disponible para riego a lo largo del ciclo de un cultivo bajo condiciones de déficit. Esta metodología maximiza el rendimiento para un cierto nivel de déficit objetivo para todo el ciclo del cultivo (expresado como relación  $ETa/ETm$  global objetivo).

El objetivo de este trabajo fue comparar los rendimientos obtenidos por un cultivo de zanahoria en Brasil, sometido a 6 relaciones  $ETa/ETm$  globales objetivo (1,0, 0,9, 0,8, 0,7, 0,6 y sin riego) aplicando un riego deficitario constante por etapas "CDI" (la relación  $ETa/ETm$  de cada etapa se mantuvo constante e igual a la objetivo) y un riego deficitario optimizado por etapas "ORDI" (la relación  $ETa/ETm$  de cada etapa es diferente, pero la global del ciclo es igual a la objetivo).

## 2) Materiales y métodos

El estudio se realizó en un área experimental de SIPA - Integrado de Producción Agroecológica, que se encuentra en Seropédica-RJ (latitud 22°48'00 " S; longitud 43°41'00"W; altitud de 33 m). El suelo de la zona se clasifica como Argisol, el clima es Aw en la clasificación de Köppen. Las temperaturas medias anuales son aproximadamente de 28°C y la precipitación de unos 1200 mm, con un período de 5 meses muy secos. Los experimentos de campo se realizaron del 7 agosto (siembra) al 8 noviembre (cosecha) en 2013 y del 13 de junio al 11 de septiembre en 2014. El cultivar de zanahoria utilizado fue Brasília Irecê, que se caracteriza por desarrollar plantas de tamaño medio (de 25 a 35 cm), sus raíces son cilíndricas con longitudes entre 15 y 22 cm y un diámetro de 3 a 4 cm, es de color naranja claro y presenta baja incidencia a enfermedades como el hombro verde o púrpura. Además, esta variedad soporta bien el calor, es robusta y la tendencia a entrar en floración en condiciones de día largo es baja. El sistema de riego utilizado fue el localizado por goteo, con un ramal por cada dos líneas de cultivo y un espaciamiento de emisores de 10 cm aportando un caudal de 4 litros metro<sup>-1</sup>. Las dimensiones de las parcelas experimentales fueron 1,0 m x 2,0 m, donde las líneas de cultivo estaban separadas 0,25 m. Los datos climáticos fueron registrados por una estación meteorológica situada a 20 metros de la zona de ensayo, las informaciones diarias fueran utilizadas para estimar la evapotranspiración de referencia pela ecuación de Penman-Montheih FAO56 (ALLEN et al., 1998).

Cada tratamiento consistió en cuatro parcelas (repeticiones), todos dentro del mismo sitio. Se evaluaron dos métodos de aplicación de riego deficitario, los llamados: CDI (déficit de agua constante) y ORDI (déficit de agua optimizado en etapas). Para ambos métodos se aplicaron 6 relaciones  $ETa/ETm$  globales objetivo (1,0, 0,9, 0,8, 0,7, 0,6 y sin riego). El riego fue aplicado cada dos días, programación que es utilizada convencionalmente por los productores de la zona que hacen uso del sistema de riego por goteo.

La metodología ORDI maximiza el rendimiento para un cierto nivel  $ETa/ETm$  objetivo global. Los datos de entrada al modelo son: el rendimiento potencial, la  $ETm$  acumulada para cada etapa de desarrollo del cultivo para un año de referencia, los valores de  $Ky$  (coeficiente de sensibilidad al estrés hídrico) de cada etapa de desarrollo que deben ser calibrados con anterioridad para la zona y la variedad, y la relación  $ETa/ETm$  global objetivo. Mediante un software de optimización no lineal, ORDI determina las relaciones  $ETa/ETm$  teóricas para cada etapa de  $Ky$  que maximiza el rendimiento del cultivo. Para calibrar y validar los coeficientes de  $Ky$  se utilizaron los datos de dos ensayos realizados en Brasil en los años 2010 y 2011 (Carvalho et al., 2014). Las relaciones  $ETa/ETm$  determinadas por ORDI para cada etapa de desarrollo (establecimiento, desarrollo vegetativo, etapa media y maduración), en función de la  $ETa/ETm$  global objetivo fueron:

- 1ª campaña 2013: ETa/ETm objetivo = 0,6 (0,95, 0,63, 0,50 y 0,50), ETa/ETm objetivo = 0,7 (1,0, 0,96, 0,56 y 0,50), ETa/ETm objetivo = 0,8 (1,0, 1,0, 0,78 y 0,50), y ETa/ETm objetivo = 0,9 (1,0, 1,0, 0,98 y 0,59).
- 
- 2ª campaña 2014: ETa/ETm objetivo = 0,6 (0,95, 0,61, 0,50 y 0,50), ETa/ETm objetivo = 0,7 (1,0, 0,94, 0,54 y 0,50), ETa/ETm objetivo = 0,8 (1,0, 1,0, 0,77 y 0,50) y ETa/ETm objetivo = 0,9 (1,0, 1,0, 0,98 y 0,58).
- 

Obviamente, las relaciones ETa/ETm objetivo = 1 y sin riego no pueden optimizarse. En el caso de los tratamientos CDI la relación ETa/ETm de cada etapa se mantuvo constante e igual a la objetivo en todas las etapas.

Este estudio evaluó la longitud de la raíz, la productividad total y la productividad comercial, además de la aparición de daños y el ataque de nematodos. Tras la cosecha, las raíces se lavaron y se clasificaron en cinco niveles comerciales: 10 (> 10 <14 cm), 14 (> 14 <18 cm), 18 (> 18 <22 cm), 22 (> 22 <26 cm) y 26 (> 26 cm); y no comercial ( $\leq$  10 cm y / o defectuosa) (HortiBrasil, 2002).

### 3) Resultados y discusión

En los dos años de ensayo no aparecieron diferencias estadísticamente significativas entre los rendimientos totales cuando se compararon las metodologías ORDI y CDI. Sin embargo, un alto porcentaje de las raíces obtenidas con la estrategia CDI presentaron deficiencias en términos de calidad (malformaciones, tamaños inadecuados, grietas, etc) que ocasionaron una disminución del rendimiento comercial. En este sentido, los rendimientos comerciales de los tratamientos ORDI fueron significativamente superiores a los CDI, llegando al 50% en el tratamiento 0,6 y de alrededor del 24% para el resto de tratamientos (Tabla 1).

Tabla 1. Rendimiento total y comercial obtenido por los tratamientos CDI y ORDI.

	ETa/ETm	CDI			ORDI		
		Lámina (mm)	Rend. Total (t ha <sup>-1</sup> )	Rend. Comercial (t ha <sup>-1</sup> )	Lámina (mm)	Rend. Total (t ha <sup>-1</sup> )	Rend. Comercial (t ha <sup>-1</sup> )
2013	S/Irrig	201,4*	29,21*	12,92*	-	-	-
	0,6	285,0	39,68	19,84	276,7	37,92	28,44
	0,7	298,9	47,62	28,91	295,6	46,92	37,28
	0,8	312,9	56,48	37,32	309,8	55,84	45,37
	0,9	326,8	63,17	43,43	322,4	62,35	51,77
	1,0	340,7*	66,70*	60,23*	-	-	-
2014	S/Irrig	153,4*	39,10*	17,13*	-	-	-
	0,6	224,3	55,53	29,66	216,33	53,36	44,77
	0,7	236,3	63,00	41,68	230,33	62,87	52,77
	0,8	247,9	68,20	47,50	247,77	68,48	60,99
	0,9	259,7	71,77	55,53	263,71	73,28	66,98
	1,0	271,5*	77,25*	73,85*	-	-	-

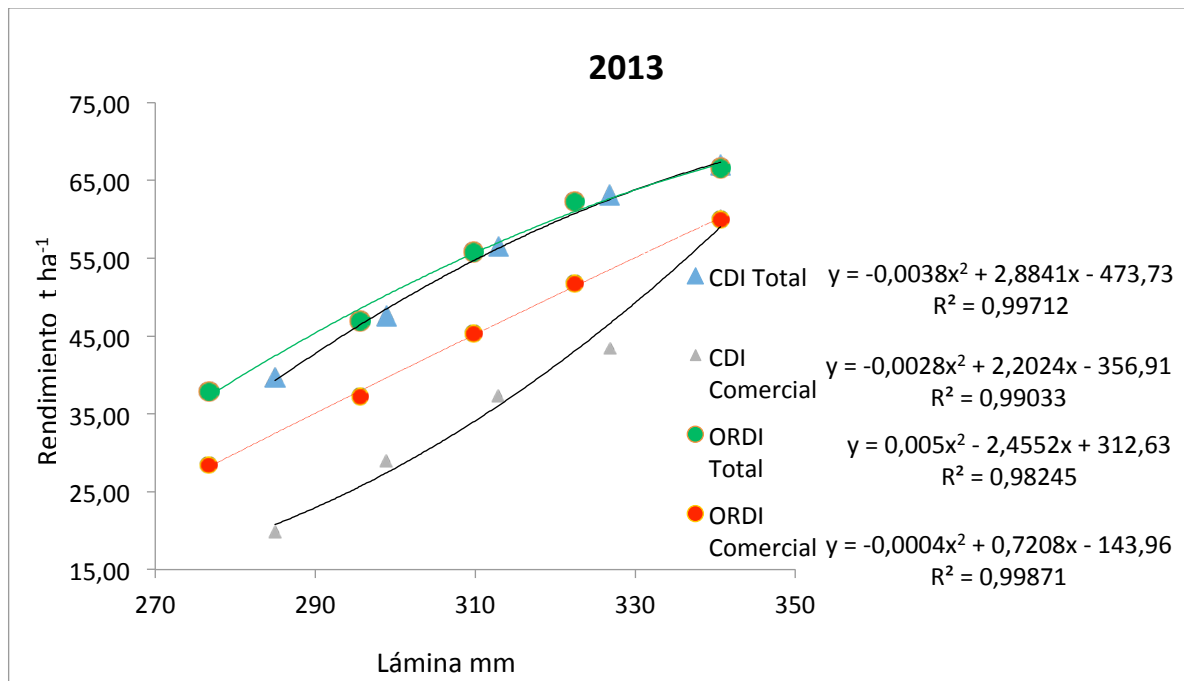
\*Los valores marcados son referentes a los tratamientos sin riego y controle, que son iguales para las dos metodologías.

Como era de esperar, en ambos años los mayores rendimientos (total y comercial) fueron obtenidos por los tratamientos sin déficit. Estos coinciden con los obtenidos por otros autores. Nagaz et al. (2012) determinó que el rendimiento de zanahoria disminuyó con valores entre 80-60% de la ETa. Oliveira Neto (2013) y Gomes et al. (2012) obtuvieron en sus ensayos rendimientos máximos de aproximadamente 62 t ha<sup>-1</sup> y 75,90 t ha<sup>-1</sup>,

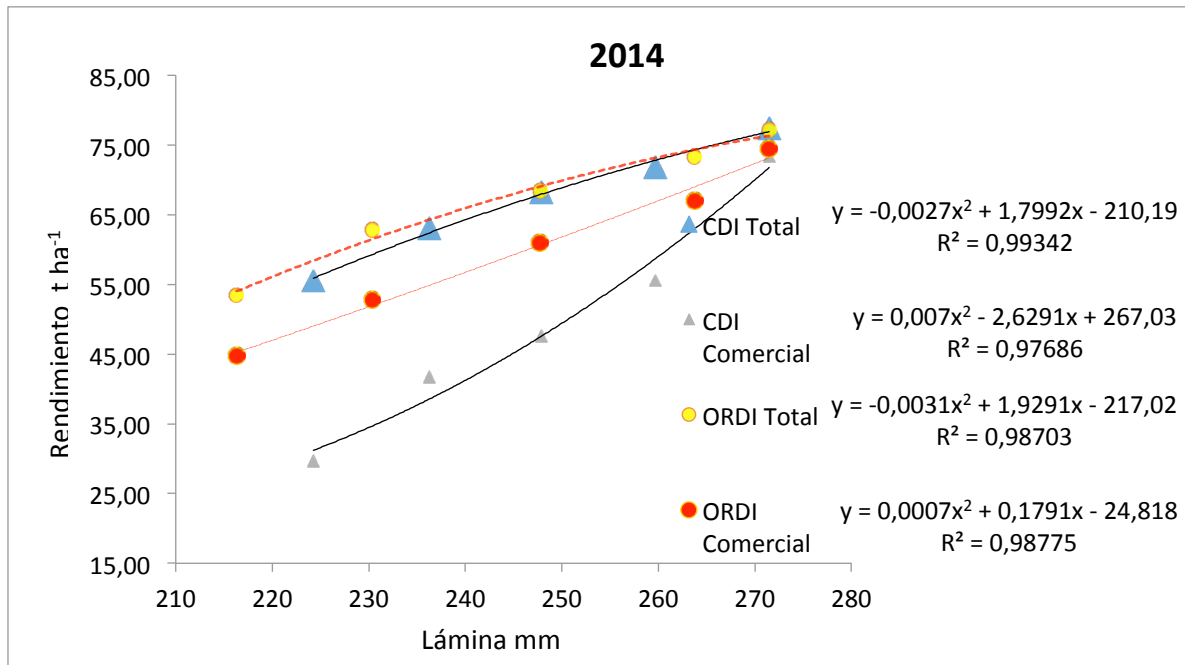
respectivamente. Lopes et al. (2008) alcanzó un rendimiento de 39 t ha<sup>-1</sup> en un tratamiento al que se aplicó un déficit del 0,6 ETm, similar a los resultados obtenidos en este estudio.

El desarrollo del cultivo está directamente relacionado con los valores de temperatura, ya que afectan a la duración de las etapas de desarrollo de la misma. Los promedios de temperatura de 2014 estuvieron dentro del rango óptimo para el desarrollo de la zanahoria (18-25 °C), proporcionando una influencia positiva en el rendimiento de la cosecha. En relación a la productividad total de raíces de zanahoria en 2014, se observa un aumento de la productividad en todos los tratamientos comparados con el año 2013 y también un menor consumo de agua. Carvalho et al., (2014) encontró valores semejantes en dos ensayos realizados en 2010 y 2011 utilizando la misma variedad de zanahoria.

Los efectos de las láminas de riego sobre las diferentes metodologías para los dos años de cultivo (2013 y 2014), en relación al rendimiento total y al rendimiento comercial, se encuentran representados por las curvas de regresión y sus respectivos coeficientes de determinación obtenidos por el modelo polinomio cuadrático (Figuras 1 y 2).



**Figura 1.** Curvas de respuesta para el rendimiento de raíces de Zanahoria para las metodologías CDI y ORDI en el cultivo del año de 2013.



**Figura 2.** Curvas de respuesta para el rendimiento de raíces de Zanahoria para las metodologías CDI y ORDI en el cultivo del año de 2014.

#### 4) Conclusiones

La metodología ORDI no ha logrado un mayor rendimiento total de raíces que la estrategia CDI. Sin embargo, en términos de rendimiento comercial, la estrategia ORDI ha sido mucho más eficiente. En consecuencia, en zonas con escasez de recursos hídricos donde se pretenda cultivar zanahoria bajo condiciones de riego deficitario, es conveniente aplicar las relaciones  $ETa/ETm$  propuestas por la metodología ORDI.

#### 5) Bibliografía

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, FAO Irrigation and Drainage. Paper 56. 319p.
- Carvalho, D. F.; Neto, D. H. O.; Ribeiro, R. L. D.; Guerra, J. G. M.; Rouws, J. R. C. (2011). Manejo da irrigação associada a coberturas mortas vegetais no cultivo orgânico da beterraba. *Engenharia Agrícola*, v.31, p. 269-277
- Carvalho D. F.; Domínguez A.; Oliveira Neto D. H.; Tarjuelo J. M.; Martínez-Romero A. (2014) Combination of date with deficit irrigation for improving the profitability of carrot in a tropical environment (Brasil). *Scientia Horticulturae*, v.179, p. 112-121..
- Domínguez A., de Juan J.A., Tarjuelo J.M., Martínez R.S., Martínez-Romero A. (2012). Determination of optimal regulated deficit irrigation strategies for maize in a semi-arid environment. *Agric. Water Manage*, 110, 67-77.
- Gomes D. P. (2012). Desempenho do consórcio de alface e cenoura, sob manejo orgânico com irrigação automatizada. Seropédica, RJ: UFRRJ, 64p. Tesis Maestria
- HORTBRASIL- Instituto Brasileiro de Qualidade em Horticultura, 2002. Disponível em: <http://hortibrasil.org.br/> Acessado em 13 de janeiro de 2013.





- Lopes, W. A. R.,; Negreiros, M. Z., Teófilo, T. M. S.; Alves, S. S. V., Martins, C. M., Nunes, G.H.S., Grangeiro, L.M.(2008).; Produtividade de cultivares de cenoura sob diferentes densidades de plantio. Revista Ceres. 483p
- Nagaz, K.; Masmoud, M.M.; Mechli, N. B. (2012). Impacts of irrigation regime with salina water on carrot productivity and soil salinity. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences. Tunisia. P. 19-27.
- Oliveira Neto, D. H. (2013). Otimização do uso da água e produtividade da cenoura (Daucus carota) sob coberturas mortas no solo, em sistema agroecológico de produção. Seropédica, RJ: UFRRJ, 77p. Tesis de Doctorado.
- Stewart, J. I., Hagan, R. M., Pruitt, W. O., Kanks, R. J., Riley, J. P., Danilson, R. E., Franklin, W. T., Jackson, E. B. (1977). Optimizing crop production through control of water and salinity levels in the soil. Reports. Paper 67

## MODELACIÓN DE LA PARTICIÓN DE LLUVIA EN ESPECIES ARBÓREAS Y ARBUSTIVAS DE CLIMA MEDITERRÁNEO

Pérez Arellano, R.<sup>1</sup>, Serrano Gómez A.<sup>2</sup>, Roldan Cañas, J.<sup>3</sup>, Moreno Pérez, M.F.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Doctorando, Universidad de Córdoba, Dpto. Agronomía (Área Ingeniería Hidráulica), Edif. Leonardo Da Vinci (Campus Rabanales), 14071 Córdoba, g82pearr@uco.es

<sup>2</sup> Ingeniero Agrónomo. Dpto. Agronomía (Área Ingeniería Hidráulica), Edif. Leonardo Da Vinci (Campus Rabanales), 14071 Córdoba, g82segoa@uco.es

<sup>3</sup> Catedrático, Universidad de Córdoba, Dpto. Agronomía (Área Ingeniería Hidráulica), Edif. Leonardo Da Vinci (Campus Rabanales), 14071 Córdoba, jroldan@uco.es

<sup>4</sup> Profesora Contratada Doctora, Universidad de Córdoba, Dpto. Agronomía (Área Ingeniería Hidráulica), Edif. Leonardo Da Vinci (Campus Rabanales), 14071 Córdoba, mfatima@uco.es

### Resumen

El estudio de la interceptación de la lluvia por el dosel de la vegetación es de gran importancia en el balance hídrico de las cuencas. Gran parte de la precipitación incidente vuelve a la atmósfera en forma de evaporación, esto implica que sólo un porcentaje de la cantidad de lluvia que cae durante un evento formará parte del caudal de la cuenca, ya sea como caudal superficial o subterráneo. El objetivo de este trabajo ha sido el estudio de los modelos de interceptación de Rutter y Gash y su aplicación a dos especies predominante en la vegetación de la cuenca de "El Cabril", en el sur de España, como son el matorral, compuesto en su mayoría de jaras (*Cistus ladanifer*) y el pino (*Pinus pinea*). Se midió la precipitación incidente, la trascolación y la escorrentía cortical en ambas especies durante cuatro años (entre octubre de 2010 y junio de 2014). Los resultados muestran que la pérdida de interceptación es mayor en el pino (29.6% de la precipitación incidente) que en la jara (17% de la precipitación incidente). El modelo analítico de Rutter modificado por Valente ofreció los mejores resultados, siendo las diferencias entre las medidas observadas y las simuladas inferiores al 2%.

### Abstract

The study of rainfall interception by the vegetation canopy is of great importance in the water balance of watersheds, because much of the precipitation returns to the atmosphere as evaporation. This implies that only a percentage of the amount of rain precipitated during an event will be part of the flow of the basin, either as surface or groundwater flows. The aim of this work has been to study the Rutter and Gash interception models and to apply them to the predominant vegetation in the watershed of "The Cabril", Southern Spain, including: scrub, composed mostly of rockrose (*Cistus ladanifer*), and arboreal masses of pine trees (*Pinus pinea*). Gross rainfall, throughfall and stemflow were measured in these species over four years (from October 2010 to June 2014). The results show that the interception loss is higher in the pine stand (27% of gross rainfall) than in the cistus stand (17% of gross rainfall). The Rutter analytical model modified by Valente gave the best results, since the differences between the observed measures and the simulated measures were lower 2%.

## 1- Introducción

La vegetación juega un importante papel en la hidrología de una cuenca, ya que afecta al balance de agua de la superficie en todos sus componentes: interceptación de lluvia incidente, infiltración, escorrentía superficial y evapotranspiración. Predecir el efecto de la vegetación sobre los recursos hídricos requiere de mediciones y modelos para extrapolar los resultados de esas mediciones en el tiempo y en el espacio.

El primer intento de modelar las pérdidas por interceptación fue realizado por Horton (1919), tanto para bosques naturales como para matorrales y arbustos. Horton observó que al inicio de los eventos de lluvia, el porcentaje de precipitación que alcanza el suelo es pequeño, aumentando conforme avanza la duración de la tormenta. En su trabajo estudió también la importancia de la forma de la hoja y el ángulo que forman respecto a la horizontal, y como cuando una vez se alcanza la máxima capacidad de almacenamiento en la hoja, el agua es drenada hacia las partes bajas.

Décadas más tarde, el estudio de la interceptación realizado por Rutter (Rutter et al., 1971) hizo posible el desarrollo de modelos basados en la física de la interceptación de lluvia. A partir de Rutter se derivan una serie de modelos como son el modelo analítico de Gash (1979), los modelos numéricos de Mulder (1985) y Whitehead y Kelliher (1991), y en menor medida el modelo estocástico de Calder (1986).

Para la elaboración de estos modelos es necesario disponer de datos como la evaporación, el coeficiente de trascolación, el porcentaje de interceptación por ramas y troncos, la resistencia aerodinámica y la capacidad de almacenamiento del dosel (Rutter et al., 1975). El modelo propuesto por Gash (1979) conserva algo de la simplicidad de un enfoque empírico, y también gran parte del razonamiento físico adoptado en el modelo numérico de Rutter (Zhang et al., 2006). Además simplifica el proceso de cálculo de la obtención de la interceptación, pasando de mediciones horarias a mediciones diarias.

Estos modelos se han aplicado en una amplia gama de tipos de bosques para estudiar su aplicación a la hora de estimar la interceptación. Por ejemplo, se han realizado estudios en coníferas (Murakami, 2007), en árboles caducifolios (Gerrits et al., 2010), en bosques subtropicales (Zhang et al. 2006) y tropicales (Wallace y McJannet, 2006). En clima mediterráneo se han aplicado en bosque de encino (*Quercus ilex*) (Pereira et al. 2009), y se han adaptado a bosques dispersos de eucaliptos y pinos (Valente et al., 1997), y de robles (Muzylo et al., 2012)

En este trabajo se seleccionaron los modelos clásicos de Rutter y de Gash, para realizar la simulación de la interceptación y comparar así un modelo numérico frente a otro analítico. Además se ha estudiado la aplicabilidad de la versión adaptada por Valente de estos modelos a bosques dispersos. Para analizar la universalidad de estos modelos, se han tomado los datos de una especie arbórea (*Pinus pinea*) y otra arbustiva (*Cistus ladanifer*) en una cuenca Mediterránea situada en el municipio de Hornachuelos (Córdoba).

En este trabajo se han hecho algunas modificaciones a los modelos para adaptarlos a la vegetación utilizada y las características climáticas de la zona (Serrano, 2013), consistentes en establecer límites a la evaporación desde el tronco y la evaporación desde el dosel en ambas versiones. En el caso del modelo original, también se ha considerado los límites establecidos en el drenaje de la cubierta, mejora que ya había sido propuesta en un trabajo anterior de Gerrits (2010).



## 2- Materiales y Métodos

Para la aplicación de los modelos de interceptación son necesarios datos horarios de parámetros climáticos tales como la velocidad del viento, la radiación solar, la temperatura y la humedad relativa, además de las medidas de campo de los diversos componentes del balance de agua. Los primeros han sido tomados de una estación agroclimática instalada en el "El Cabril" (Hornachuelos, Córdoba), mientras que los componentes del balance de agua (precipitación incidente, trascolación, escorrentía cortical e interceptación) se midieron en parcelas experimentales de *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer* para los eventos de lluvia que tuvieron lugar entre octubre de 2010 y junio de 2014 (Moreno-Pérez et al.; 2014).

El modelo de Rutter formula un balance hídrico del dosel y el tronco, en donde las entradas son la precipitación incidente a cada hora y los parámetros meteorológicos necesarios para estimar la evaporación potencial (Fig. 1). La estructura de la cubierta queda descrita por el coeficiente de escurrimiento libre ( $p$ ), el coeficiente de partición de agua del escurrimiento fustal ( $p_f$ ), la capacidad de almacenamiento de la cubierta ( $S$ ) y la capacidad de almacenamiento de los troncos ( $S_t$ ).

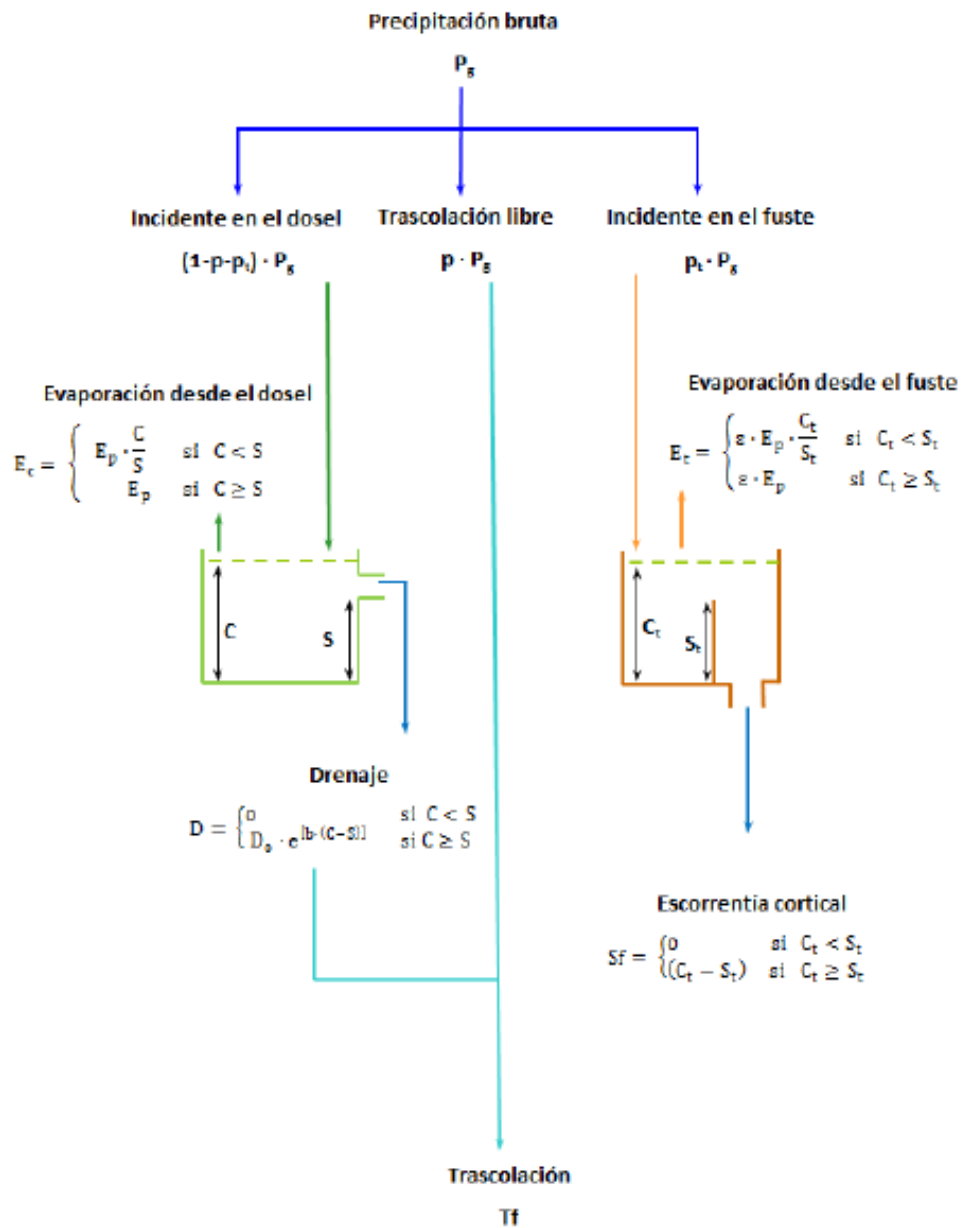


Figura 1. Modelo de Rutter esquematizado

La trascolación, el escurrimiento fustal y las pérdidas por interceptación se obtienen de un balance de agua en el dosel y en el fuste, a partir de las siguientes ecuaciones 1 y 2:

$$(1 - p - t) \int R dt = \int D dt + \int E_c dt + \Delta C \tag{1}$$

$$p_t \int R dt = Sf + \int E_t + \Delta C_t \tag{2}$$

, donde  $R$  (mm) es la intensidad de precipitación,  $D$  (mm/h) es la tasa de drenaje del dosel,  $E_c$  (mm/h) es la tasa de evaporación de la lluvia interceptada por el dosel,  $\Delta C$  (mm) es la variación en el almacenamiento del dosel,  $S_t$  (mm) es la escurrentía cortical,  $E_t$  (mm/h) es la tasa de evaporación del agua interceptada por los troncos y  $\Delta C_t$  (mm) es la variación en el almacenamiento de los troncos.

La precipitación que incide en el dosel ( $C$ ) es calculada a partir de la diferencia entre la precipitación incidente ( $P_g$ ) y los componentes ya descritos  $(1-p-p_t) \cdot P_g$ . Cuando la cantidad

de lluvia que incide en el dosel supera la capacidad de almacenamiento del mismo ( $S$ ) se produce el drenaje del dosel el cual, junto con la trascolación libre, constituye la trascolación total. Al igual que en el caso del dosel, cuando la cantidad de agua que incide en el fuste ( $C_t$ ) supera a la capacidad de almacenamiento del mismo ( $S_t$ ), se produce un nuevo flujo denominado escorrentía cortical ( $S_c$ ).

La tasa de drenaje del dosel queda descrita en la bibliografía como una función exponencial (Lloyd et al., 1988), y es calculada a partir de la ecuación 3:

$$\begin{aligned} D &= \{D_0 \cdot \exp[b \cdot (C-S)] \text{ si } C \geq S \\ D &= 0 \text{ si } C < S \end{aligned} \quad (3)$$

, donde  $D_0$  es la tasa de drenaje cuando  $C=S$  y  $b$  es un coeficiente empírico. Los valores de  $D_0$  y  $b$  utilizados en este estudio fueron tomados de por Rutter et al. (1971)

La cantidad de lluvia que queda retenida en el dosel y en el fuste durante un evento de lluvia, y es posteriormente evaporada, constituye lo que se denomina pérdidas por interceptación. Para el cálculo de estas pérdidas es fundamental determinar la evaporación potencial ( $E_p$ ), que se calcula utilizando la ecuación de Penman-Monteith (Monteith, 1965). Cuando la cantidad de lluvia que incide en el dosel ( $C$ ) es menor que la capacidad de almacenamiento del dosel ( $S$ ), la evaporación se reduce en proporción a  $C/S$ .

El modelo original de Gash (1979) es una simplificación del modelo de Rutter et al. (1971), basado en eventos singulares de lluvia, que se calibra utilizando datos meteorológicos horarios y se aplica luego con valores de lluvia diarios.

Este modelo considera que las precipitaciones ocurren como una serie de eventos de lluvia discretos, separados entre sí por un tiempo suficientemente largo como para que la planta quede completamente seca. Cada evento consta de tres fases distintas: una fase humectante, desde el inicio de la precipitación hasta que el dosel está saturado; una fase de saturación y una fase final de secado, que dura desde el final de la precipitación hasta que el dosel y los troncos estén completamente secos.

Las condiciones meteorológicas predominantes durante las dos primeras fases se supone que son los mismos y el promedio de los valores de intensidad de lluvia ( $\bar{R}$ ) y la tasa de evaporación ( $\bar{E}$ ) para las condiciones de dosel saturado se calculan para todo el período de simulación y después se aplican de forma generalizada a todos los eventos de lluvia individuales.  $\bar{E}$  se calculó utilizando la ecuación de Penman-Monteith, como en el modelo Rutter. El modelo se aplicó a partir de datos horarios, suponiendo la ocurrencia de un único evento de lluvia por día. Los componentes del proceso de interceptación se calcularon como se indica en la Tabla 1.

**Tabla 1.-** Componentes de la interceptación en la versión original del modelo de Gash.



Pérdidas por interceptación desde el dosel:	
Para m, eventos insuficientes para saturar el dosel ( $P_g \leq P'_g$ )	$(1 - p - p_t) \sum_{j=1}^m P_{g,j}$
Para n, eventos suficientes para saturar el dosel ( $P_g > P'_g$ ):	I) $n \{(1 - p - p_t)P'_g - S\}$
I) Durante el humedecimiento del dosel	II) $\frac{E}{E} \sum_{j=1}^n (P_{g,j} - P'_g)$
II) Una vez saturado el dosel	III) $n S$
III) Evaporación una vez cesada la lluvia	
Pérdidas por interceptación desde el fuste:	
Para q, tormentas que saturan el fuste ( $P_g \geq P''_g$ )	$q S_t$
Para m+n-q, tormentas que no saturan el fuste ( $P_g < P''_g$ )	$p_t \sum_{j=1}^{m+n-q} P_{g,j}$

Los modelos originales de Rutter y de Gash tenderán, en teoría, a sobreestimar la pérdida por interceptación en los bosques con vegetación dispersa, ya que asumen que el área de evaporación se extiende a toda el área de estudio, mientras que el área de evaporación real es mucho más reducida en este tipo de cuencas forestales. Valente et al. (1997) hicieron una pequeña modificación de los modelos originales de Rutter y de Gash, asumiendo que la evaporación es nula en las áreas sin vegetación y que la evaporación desde el dosel se relaciona con la evaporación desde el fuste, cuando el dosel está saturado, siendo entonces la evaporación desde el dosel  $(1-\varepsilon)E$ , y la evaporación desde el fuste,  $\varepsilon \cdot E$ . Donde  $\varepsilon$ , normalmente vale 0,02 (Serrano, 2013).

El modelo de Rutter después de las modificaciones introducidas por Valente et al. (1997) para adaptarlo a masas forestales poco densas, aparece esquematizado en la figura 2. La estructura básica del nuevo modelo es similar al modelo original Rutter, sin embargo, los cálculos se realizan de forma independiente para cada una de las sub-áreas y no, como en la versión original, para toda el área de estudio. Además, considera que solamente incidirá agua en el fuste una vez se haya saturado el dosel, desviándose el exceso de agua hacia el fuste o cayendo al suelo mediante el drenaje, para lo cual aparece un nuevo parámetro,  $p_{ot}$ , que se corresponde con la proporción de lluvia que se desvía hacia el tronco, y se sustituye la ecuación exponencial que describía el drenaje en la versión original por una ecuación lineal. La capacidad de almacenamiento  $S$  y  $S_t$  originales tienen que ser redefinidos como  $S_c$  y  $S_{tc}$ , a partir de las ecuaciones 4 y 5:

$$S_c = S c \quad (4)$$

$$S_{tc} = S_t c \quad (5)$$

, donde  $c$  representa la fracción de cobertura del dosel.

El modelo analítico de Gash revisado por Valente incluye modificaciones muy similares a los utilizados para el modelo de vegetación dispersa de Rutter. También se consideran dos sub-áreas distintas (área abierta y área cubierta), cada uno con la misma entrada de lluvia. La evaporación del dosel saturado se calcula, como en la versión original

del modelo, a través de la ecuación de Penman-Monteith, aunque  $\bar{E}$  es ahora sustituida por la expresión  $(1-\varepsilon)\bar{E}_c$ , y la evaporación de la zona abierta se supone que es cero (Tabla 2).

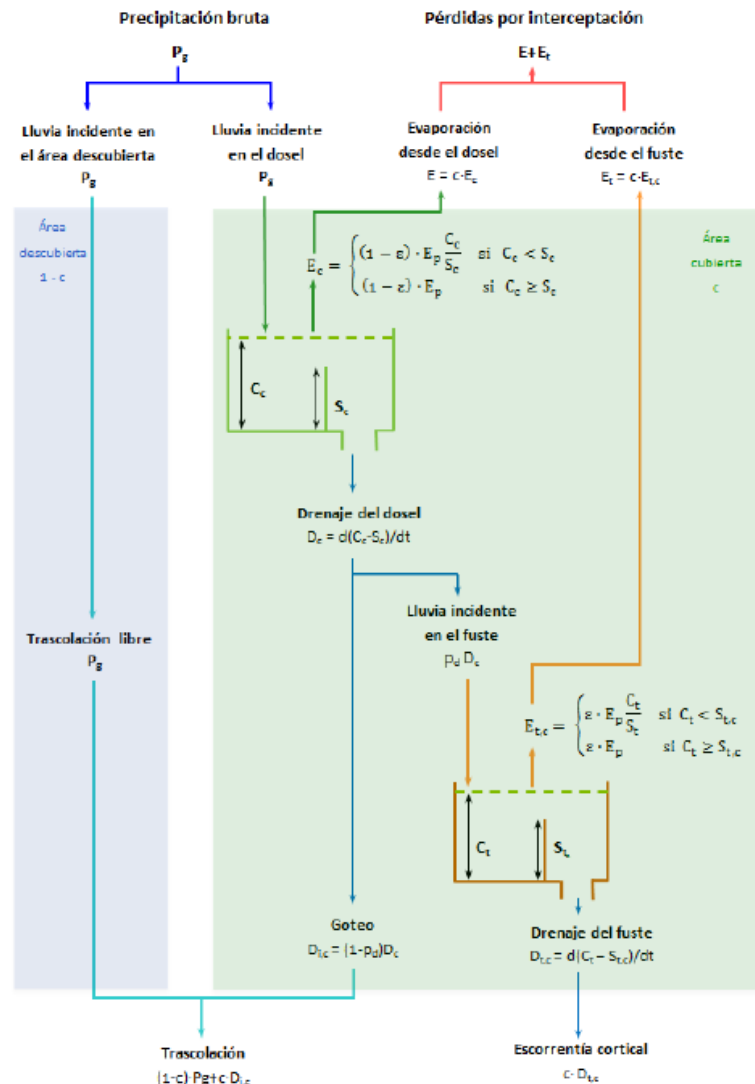


Figura 2. Modelo de Rutter modificado por Valente et al. (1997)

**Tabla 2.-** Componentes de la interceptación en el modelo de Gash revisado por Valente

Pérdidas por interceptación desde el dosel:	
Para m, eventos insuficientes para saturar el dosel ( $P_g \leq P_g'$ )	$c \sum_{j=1}^m P_{g,j}$
Para n, eventos suficientes para saturar el dosel ( $P_g > P_g'$ ):	I) $n c P_g' - n c S_c$
I) Durante el humedecimiento del dosel	II) $c \frac{(1-\epsilon)\bar{E}_c}{R} \sum_{j=1}^n (P_{g,j} - P_g')$
II) Una vez saturado el dosel	III) $n c S_c$
III) Evaporación una vez cesada la lluvia	
Pérdidas por interceptación desde el fuste:	
Para q, tormentas que saturan el fuste ( $P_g \geq P_g''$ )	$q S_t$
Para n-q, tormentas que no saturan el fuste ( $P_g < P_g''$ )	$p_d c \left[ 1 - \frac{(1-\epsilon)\bar{E}_c}{R} \right] \sum_{j=1}^n (P_{g,j} - P_g'')$

El primer paso para aplicar los modelos de interceptación fue determinar los coeficientes que participan en ellos: la capacidad de almacenamiento del dosel (S) y del tronco (S<sub>t</sub>), el coeficiente de trascolación libre (ρ) y la proporción de lluvia que se desvía hacia el tronco (ρ<sub>d</sub>). Estos han sido determinados por métodos gráficos.

Los coeficientes de trascolación libre (ρ) y la capacidad de almacenamiento del dosel (S) se determinan siguiendo los criterios de Gash y Morton (1978), a partir de la representación gráfica de la precipitación bruta frente a la trascolación correspondiente a eventos individuales precedidos por 8 h sin lluvia (tiempo necesario para que se seque completamente el dosel), siendo S el valor de la trascolación cuando la precipitación bruta es nula para eventos que saturan el dosel, mientras ρ viene dado por la pendiente de la recta que se ajusta a los puntos representados para los eventos de lluvia insuficientes para saturar el dosel.

Los parámetros de escorrentía cortical utilizados en las versiones originales de los modelos, S<sub>t</sub> y p<sub>d</sub>, se obtienen siguiendo la metodología de Leyton (1967), como el punto de corte con el eje de ordenadas y la pendiente, respectivamente, de la línea de regresión entre la escorrentía cortical y la precipitación incidente. Los parámetros de escorrentía cortical para las versiones dispersas de los modelos (S<sub>t</sub> y ρ<sub>d</sub>) se estimaron a partir de la regresión lineal entre la escorrentía cortical y (T<sub>f</sub> - (1 - c)P<sub>g</sub>), de acuerdo con el método descrito por Valente et al. (1997).

### 3- Resultados y Discusión

En la Tabla 3 se muestran los valores de los parámetros del modelo estimados de acuerdo con los procedimientos descritos anteriormente, para las dos parcelas experimentales. Se observa una mayor capacidad de almacenamiento del dosel y una menor capacidad de almacenamiento en el tronco de *Pinus pinea* con respecto a *Cistus ladanifer*, estas diferencias se debe a la distinta morfología y arquitectura de cada especie

**Tabla 3.-** Valores estimados de los parámetros para las especies *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*

Parámetro	<i>Pinus pinea</i>	<i>Cistus ladanifer</i>
$p$	0.304	0.622
$S$ (mm)	3.435	0.899
$p_t$	0.004	0.184
$S_t$ (mm)	0.013	0.095
$p_d$	0.012	0.504
$\epsilon$	0.02	0.02

Los valores totales de la precipitación bruta, trascolación, escorrentía cortical y la pérdida de la interceptación de las parcelas de pinos y eucaliptos, desde Octubre de 2010 hasta el Junio de 2014 se muestran en la tabla 4. La pérdida de interceptación se obtuvo como la diferencia entre la precipitación y la suma de la trascolación más la escorrentía cortical. La pérdida total interceptación fue mayor en la parcela del pino (29.6% de la precipitación incidente) que en la parcela de la jara (17% de la precipitación incidente).

**Tabla 4.-** Valores de las medidas acumuladas de precipitación incidente, trascolación, escorrentía cortical e interceptación para el período de Octubre de 2010 a Junio de 2014.

Parcela experimental	Precipitación incidente (mm)	Trascolación		Escorrentía cortical		Interceptación	
		mm	% P	mm	% P	mm	% P
<i>Pinus pinea</i>	2083.6	1460.0	70.1	7.0	0.3	616.6	29.6
<i>Cistus ladanifer</i>	1334.2	877.5	65.8	229.3	17.2	227.4	17.0

Los resultados obtenidos con las versiones originales y para bosques dispersos tanto del modelo de Rutter y del modelo de Gash se muestran en la Tabla 5. Se puede observar que los resultados obtenidos por los modelos se ajustan muy bien a los datos obtenidos en campo, especialmente en el caso de *Pinus pinea*, donde ninguno de los resultados de los modelos difieren más del 6% respecto las medidas observadas en campo.

**Tabla 5.-** Resultados obtenidos de la aplicación de los diferentes modelos en el presente trabajo (los valores entre paréntesis son la diferencia en porcentaje respecto del valor observado)

Modelo	Interceptación simulada (mm)		Interceptación simulada (%)	
	<i>Pinus pinea</i>	<i>Cistus ladanifer</i>	<i>Pinus pinea</i>	<i>Cistus ladanifer</i>
Rutter (1975)	642.9 (+1.3%)	319.2 (+6.9%)	30.9	23.9
Gash (1979)	649.4 (+1.6%)	365.2 (+10.3%)	31.2	27.4
Rutter mod. Valente (1997)	572.2 (-1.2%)	202.4 (-1.9%)	28.7	25.2
Gash mod. Valente (1997)	508.4 (-5.2%)	172.1 (-4.1%)	24.4	12.9

Tal como se observa en la figura 3, cuando se reformulan los dos modelos para explicar la naturaleza dispersa de los bosques, disminuye la interceptación simulada. El modelo de Gash es el que realiza peores predicciones sobreestimando en gran medida las pérdidas por interceptación. El modelo de Rutter revisado por Valente aunque subestima la interceptación que tiene lugar en ambas especies, es el modelo que mejor se ajusta a las observaciones realizadas en campo, corrigiendo la sobreestimación del modelo original.

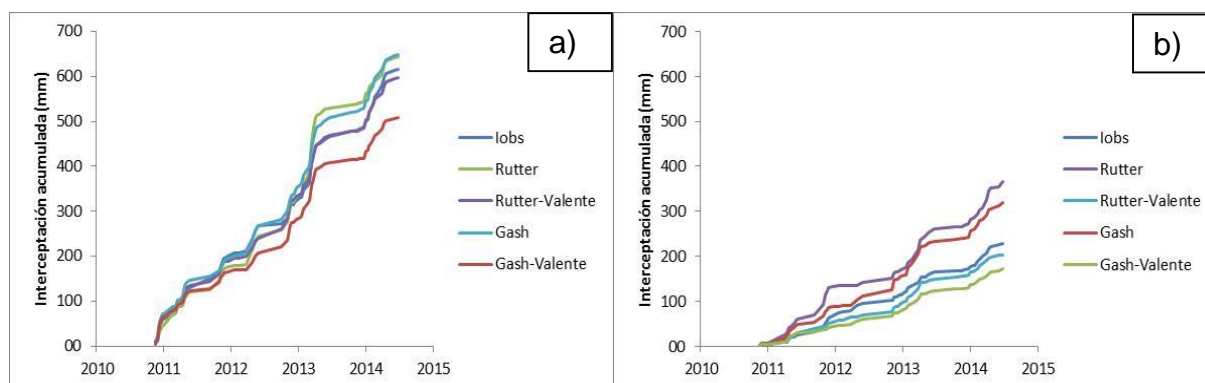


Figura 3. Interceptación medida acumulada en comparación con la estimada para las versiones originales y dispersas en *Pinus pinea* (a) y *Cistus ladanifer* (b), durante 2010-2014.

#### 4- Conclusiones

Todos los parámetros meteorológicos y de vegetación derivados para el modelo de análisis de la pérdida de interceptación se estimaron por separado para cada especie. Se observa una mayor capacidad de almacenamiento del dosel y una menor capacidad de almacenamiento del fuste en *Pinus pinea* en comparación con *Cistus ladanifer*, valores acordes a las características de cada especie.

Los resultados de la modelización muestran claramente que las versiones originales de los modelos tanto de Rutter como Gash sobreestiman significativamente la pérdida de interceptación en las dos parcelas estudiadas, ya que estas versiones de los modelos no tienen en cuenta que la zona de evaporación real (dosel + troncos) es más reducida en los bosques dispersos.

Tanto en el caso de *Pinus pinea* como en el de *Cistus ladanifer*, el modelo de Gash es el que muestra unos valores más alejados a los medidos en campo, obteniéndose unos resultados que sobreestiman las pérdidas por interceptación.

Se ha obtenido un buen ajuste entre la observación y la predicción cuando el modelo Rutter se reformula para dar cuenta de la naturaleza dispersa del bosque. Las versiones revisadas por Valente de los modelos de Rutter y Gash, en comparación con las versiones originales, mejoran la estimación de la pérdida total de interceptación.

El modelo de Rutter revisado por Valente es el modelo que mejor se ajusta a los valores de interceptación medidos en campo. Los resultados de este modelo indican una buena correlación entre los valores de interceptación modelados y los experimentales, siendo por tanto el más recomendable para el cálculo de las pérdidas de interceptación que tienen lugar en bosques dispersos en este tipo de clima.

La principal debilidad de las versiones reformuladas de ambos modelos es probablemente el supuesto de que la evaporación para el dosel saturado de un bosque disperso se puede estimar adecuadamente por la ecuación de Penman-Monteith. Sin embargo, los resultados obtenidos aquí sugieren que esto es probablemente una simplificación adecuada y aceptable.



## 5.- Agradecimientos

Este trabajo se desarrolló en el marco del proyecto de investigación "Balance hídrico superficial en la cuenca hidrológica de El Cabril" financiado por ENRESA (Empresa Nacional de Residuos Radiactivos) y la Universidad de Córdoba. Los autores desean expresar su agradecimiento al personal del Departamento de Ingeniería de Suelos de ENRESA por su continua y eficaz colaboración.

## Referencias

- Calder, I.R. 1986. A stochastic model of rainfall interception. *Journal of Hydrology*, 89: 65-71.
- Gash J.H.C. y Morton A.J. 1978. An application of the Rutter model to the estimation of the interception loss from Thetford forest. *Journal of Hydrology*, 90: 1-9.
- Gash J.H.C. 1979. An analytical model of rainfall interception by forest. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 105: 43-55.
- Gerrits A.M.J. 2010: The role of interception in the hydrological cycle. Tesis doctoral. Delft University of Technology, Holanda.
- Horton R. 1919. Rainfall interception. *Monthly Weather Review*, 47: 603-623.
- Leyton L., Reynolds E.R.C. y Thompson F.B. 1967. Rainfall interception in forest and moorland. In: W.E. Sopper and H.W. Lull (Editors), *International Symposium on Forest Hydrology*. Pergamon, Oxford, pp. 163-178.
- Lloyd C.R., Gash J.H.C., Shuttleworth W.J. y Marques A.O. 1988. The measurement and modelling of rainfall interception by Amazonian rainforest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 43: 277-294.
- Monteith J.L. 1965. Evaporation and the environment. In *Symposium of the Society of Experimental Biology*, 19: 245-269.
- Moreno-Pérez M.F., Serrano-Gómez A. y Roldán J. 2014. Application of interception models in a watershed with Mediterranean type climate. EGU General Assembly. Viena (Austria).
- Mulder J.P.M. 1985. Simulating interception loss using standard meteorological data. In: B.A. Hutchison and B.B. Hicks (Editors). *The Forest-Atmosphere Interaction*. D. Reidel, Dordrecht, Netherlands, pp. 177-196.
- Murakami S. 2007. Application of three canopy interception models to a young stand of Japanese cypress and interpretation in terms of interception mechanism. *Journal of Hydrology*. 342: 305-319.
- Muzylo A., Llorens P. y Domingo F. 2012. Rainfall Partitioning in a Deciduous Forest Plot in Leafed and Leafless Periods. *Ecohydrol.*, 5: 759-767.
- Pereira F.L., Gash J.H.C., David J.S., David T.S., Monteiro P.R. y Valente F. 2009. Modelling interception loss from evergreen oak Mediterranean savannas: Application of a tree-based modeling approach. *Agricultural and Forest Meteorology*. 149: 680-688.





- Rutter A.J., Kershaw K.A., Robins P.C. y Morton A.J. 1971. A predictive model of rainfall interception in forest. I. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine. *Agricultural Meteorology*, 9: 367-384.
- Rutter A.J., Morton A.J. y Robins P.C. 1975. A predictive model of rainfall interception in forest. II. Generalization of the model and comparison with observations in some coniferous and hardwood stands. *Journal of Applied Ecology*, 12: 367-380.
- Serrano A. 2013. Uso de moledos de interceptación de lluvia en la cuenca hidrológica de “El Cabril” (Córdoba). Trabajo Profesional Fin de Carrera. Universidad de Córdoba.
- Valente F.; David J. y Gash J. 1997. Modelling interception loss for two sparse eucalypt and pine forests in central Portugal using reformulated Rutter and Gash analytical models. *Journal of Hydrology*, 190: 141-162.
- Wallace J. y McJannet D. 2006. On interception modeling of a lowland coastal rainforest in northern Queensland, Australia. *Journal of Hydrology*. 329: 477-488.
- Whitehead D. y Kelliher F.M. 1991. A canopy water balance model for a *Pinus radiata* stand before and after thinning. *Agile. For. Meteorol.*, 55: 109-126.
- Zhang G., Zeng G.M., Jiang Y.M., Huang G.H., Li J.B., Yao J.M., Tan W., Xiang R.J. y Zhang X.L. 2006. Modelling and measurement of two-layer canopy interception losses in a subtropical mixed forest of central-south China. *Hydrology and Earth System Sciences* 10: 65–77.



## ESTIMACIÓN DE LA EVAPORACIÓN/TRANSPIRACIÓN EN UN CULTIVO DE TRIGO MEDIANTE RADIOMETRÍA TÉRMICA

Sánchez, J.M.<sup>(1)</sup>, López-Urrea, R.<sup>(2)</sup>, Doña, C.<sup>(3)</sup>, Caselles, V.<sup>(4)</sup>, González-Piqueras, J.<sup>(5)</sup>

<sup>1</sup> Profesor, UCLM, Dpto. Física Aplicada, Plz. Manuel Meca s/n, 13400 Almadén, [juanmanuel.sanchez@uclm.es](mailto:juanmanuel.sanchez@uclm.es)

<sup>2</sup> Investigador, ITAP-FUNDESCAM, Polígono Campollano, Avda. 2ª-42 B, 02007 Albacete. [rlu.itap@dipualba.es](mailto:rlu.itap@dipualba.es)

<sup>3</sup> Doctoranda, UV, Dpto. Física de la Tierra y Termodinámica, C/Dr. Moliner 50, 46100 Burjassot, [carolina.dona@uv.es](mailto:carolina.dona@uv.es)

<sup>4</sup> Catedrático, UV, Dpto. Física de la Tierra y Termodinámica, C/Dr. Moliner 50, 46100 Burjassot, [Vicente.caselles@uv.es](mailto:Vicente.caselles@uv.es)

<sup>5</sup> Profesor, UCLM, Dpto. Física Aplicada, Av. España s/n, 02071 Albacete, [jose.gonzalez@uclm.es](mailto:jose.gonzalez@uclm.es)

### Resumen

En este trabajo se propone la aplicación de un modelo de balance de energía de dos fuentes que, junto con medidas de la temperatura de la superficie, proporcione valores horarios y diarios de los flujos energéticos en superficie, incluyendo la evapotranspiración real del cultivo de trigo ( $ET_c$ ). Para mostrar la aplicación y utilidad del método se realizó un experimento en la primavera de 2014 sobre una plantación de trigo situada dentro de la finca experimental "Las Tiesas" en el término de Barrax, Albacete. Se midieron temperaturas del suelo y de la vegetación, además de variables meteorológicas y parámetros biofísicos, desde el momento de la siembra hasta la recolección. Los resultados se compararon con las medidas de un lisímetro de pesada instalado en la parcela, obteniendo unos errores de estimación de  $\pm 0,10 \text{ mm h}^{-1}$  y  $\pm 0,9 \text{ mm d}^{-1}$  a escalas horaria y diaria, respectivamente. Por su parte el valor de  $ET_c$  acumulado para toda la campaña fue solo el 4% mayor que el valor medido en el lisímetro. Además, el porcentaje entre la componente evaporativa (E) y transpirativa (T) fue de 30%-70% para el total de la campaña. El modelo también permite estimar los coeficientes de cultivo del trigo, y compararlos con los propuestos por FAO56.

### Abstract

This work shows the application of a two-source energy balance model, together with surface temperature measurements, to derive hourly and daily values of land surface energy fluxes of wheat, crop evapotranspiration ( $ET_c$ ) included. An experiment was carried out during the spring of 2014 in a wheat field located in the experimental farm of "Las Tiesas" in Barrax, Albacete. Soil and canopy radiometric temperatures were measured, as well as meteorological variables and biophysical parameters, from plantation to senescence. Results were compared to measurements in a weighing lysimeter installed within the wheat field. Estimation errors of  $\pm 0.10 \text{ mm h}^{-1}$  and  $\pm 0.9 \text{ mm d}^{-1}$  were obtained at hourly and daily scales, respectively. Cumulated value of  $ET_c$  for the whole campaign was only 4% over that registered in the lysimeter. Furthermore, a percentage 30% - 70% between evaporation (E) and transpiration (T) components was obtained for the full campaign. Modeled values of the wheat crop coefficients were also retrieved and compared to those proposed by FAO56.

## 1- Introducción

El trigo es uno de los cultivos más importantes a nivel mundial, cubriendo una extensión de 218 millones de hectáreas en 2013. Dentro del ámbito de la Unión Europea (UE) más de 25 millones de hectáreas se cultivaron de trigo en 2013, resultando en una producción de 143.3 millones de toneladas, lo que supone aproximadamente el 20% de la producción mundial. España es el quinto país productor dentro de la UE, con una extensión de 2,1 millones de hectáreas y una producción de 7,6 millones de toneladas (FAO 2014). Castilla y León es la región española con la mayor superficie cultivada de trigo (entorno a 780.000 ha), seguida por Castilla-La Mancha, con una extensión de más 320.000 ha (MAGRAMA 2014).

Conocer las necesidades hídricas del trigo, pasa por disponer de un buen conocimiento de la evapotranspiración. Lo más habitual y extendido para realizar un balance de agua entre el suelo y la planta, o estimar las necesidades hídricas del cultivo, es el uso del método conocido como FAO-56 (Allen et al. 1998). De acuerdo con la metodología de FAO-56, la evapotranspiración real del cultivo se estima combinando la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) y los coeficientes de cultivo. Existen dos versiones del método FAO-56: la técnica del coeficiente de cultivo único, y la del coeficiente de cultivo dual. La primera se usa para expresar conjuntamente la transpiración de la planta y la evaporación del suelo a través de un coeficiente de cultivo ( $K_c$ ). La técnica del coeficiente de cultivo dual consiste en utilizar dos coeficientes de cultivo distintos para representar la contribución de la planta ( $K_{cb}$ ) y de la evaporación del suelo ( $K_e$ ) (Allen et al. 1998). La técnica del coeficiente de cultivo dual puede mejorar la precisión en la estimación de  $ET_c$  cuando se dispone de una calibración previa adecuada de dichos coeficientes. Esta técnica se ha aplicado y explorado bajo una gran variedad de condiciones climáticas alrededor de todo el mundo (Hunsaker et al. 2005; Williams y Ayars 2005; López-Urrea et al. 2009, 2102, 2014; Campos et al. 2010; Howell et al. 2012; Zhang et al. 2013). Todos estos autores coinciden en que los valores de los mencionados coeficientes de cultivo pueden servir como punto de partida para la programación del riego, pero también destacan la necesidad de una corrección de estos coeficientes para ajustarlos a las condiciones locales para evitar los errores importantes que se pueden presentar debido a su naturaleza empírica.

Con este objetivo, en los últimos años se ha trabajado mucho en el marco de las posibilidades que ofrecen las medidas de Teledetección para estimar las necesidades hídricas de los cultivos, y de esta forma mejorar las programaciones de riego, y la productividad del agua. La combinación de un modelo de balance de energía de dos fuentes con medidas locales de temperatura radiométrica se ha mostrado como una técnica efectiva para estimar valores de evapotranspiración bajo una variedad de cultivos y condiciones ambientales (French et al. 2007; Sánchez et al. 2008, 2011, 2014; Colaizzi et al. 2012; Kustas et al. 2012). La técnica que se presenta en este trabajo se ha utilizado recientemente por Sánchez et al. (2014) para separar las componentes evaporativa y transpirativa, además de obtener coeficientes de cultivo dual para cultivos de girasol y colza. Todos los detalles sobre el modelo simplificado de balance de energía de dos fuentes (STSEB) empleado, así como del diseño experimental, pueden consultarse en Sánchez et al. (2014). En este trabajo nos centramos en los datos de una nueva campaña experimental que se llevó a cabo en la campaña de primavera de 2014 en un cultivo de trigo situado en una zona semiárida de la meseta sur de España.

## 2- Materiales y métodos

Este estudio se centra en un experimento llevado a cabo entre los meses de febrero y junio de 2014, en la finca experimental de "Las Tiasas" (2° 5'W, 39° 3'N, 695 m altitud)

situada en la provincia de Albacete. Se trata de una zona semiárida, caracterizada por un clima Mediterráneo templado. La zona concreta de estudio es una parcela de 100 x 100 m<sup>2</sup> que cuenta con un lisímetro de pesada (2,7 m largo, 2,3 m ancho y 1,7 m profundidad) instalado en el centro de la misma, con una resolución de 0,04 mm en equivalente de agua. Los lisímetros de pesada siguen siendo en la actualidad la técnica más precisa para la medida directa de la ET de los cultivos (Howell et al., 1995), si bien es cierto que su instalación y mantenimiento hace poco viable su uso extendido y operativo, quedando éste limitado a parcelas experimentales con fines de investigación.

El trigo (*Triticum aestivum* L. cv. 'Califa') se sembró el 4 de febrero con una separación entre filas de plantas de 15 cm y una población de semillas de 550 semillas por metro cuadrado (Fig. 1). Se realizó un esfuerzo para mantener el trigo dentro de los límites del lisímetro en el mismo estado de desarrollo y crecimiento que el cultivo en la parcela de protección. La parcela contaba con un sistema automatizado de riego por aspersión mediante cobertura total enterrada, con un marco de aspersores de 15 m x 12,5 m que permite suministrar una pluviometría de 8,6 mm h<sup>-1</sup>. A lo largo de toda la duración del experimento el trigo se mantuvo bien regado, evitando condiciones de estrés hídrico en todo momento.



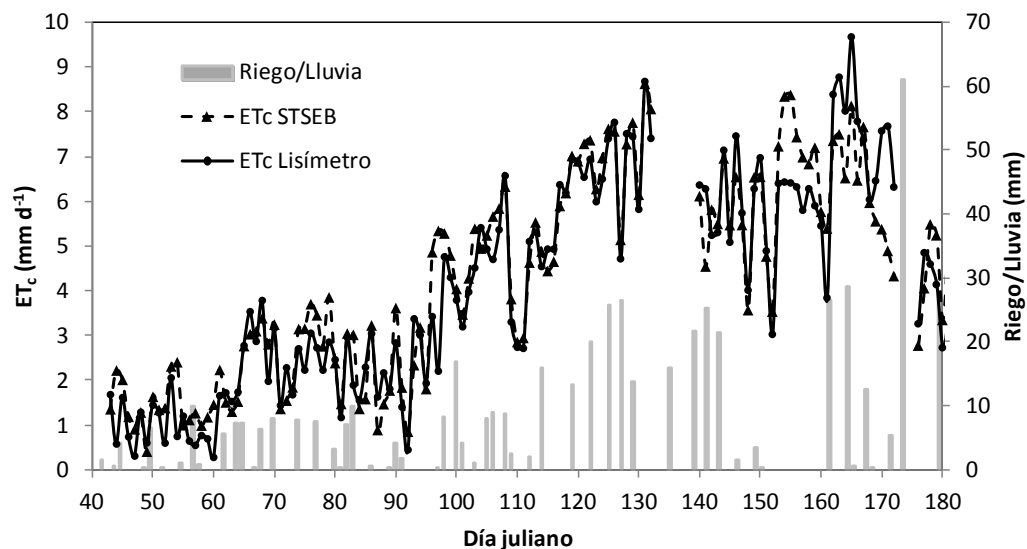
**Figura 1.** Montaje experimental sobre el lisímetro para los días julianos 55 y 129 (superior), y panorámica de la condiciones de la plantación del trigo para los días 153 y 174 (inferior).

Se realizaron medidas de proporción de vegetación ( $P_v$ ) y altura de la planta, en tres zonas diferentes y de forma periódica. En cuanto a los radiómetros, se emplearon tres radiómetros de infrarrojo térmico (IRT) Apogees SI-121 (Apogee Instruments, Logan UT, USA). Se trata de instrumentos térmicos de banda ancha (8-14  $\mu\text{m}$ ) con una precisión de  $\pm 0,2$  °C, un campo de visión de 18°, y un intervalo válido de temperaturas entre -30 y 65 °C. Uno de ellos se colocó a una altura de 2 m sobre el perímetro del lisímetro, apuntando a la superficie con una visión desde la vertical y midiendo de esta forma la temperatura efectiva el conjunto ( $T_R$ ). Otro de los radiómetros se colocó a una altura de 20 cm directamente apuntando al suelo entre dos filas de plantas (Fig. 1) para registrar la temperatura del suelo ( $T_s$ ). La temperatura de las plantas ( $T_c$ ) se calculó a partir de  $T_R$  y  $T_s$ , empleando la información de  $P_v$ . Todas las temperaturas se sometieron al proceso de corrección atmosférica y de emisividad. Para la corrección atmosférica se empleó un tercer Apogee, colocado apuntando al cielo con un ángulo de 53° respecto a la vertical. Las medidas de temperatura comenzaron el día 42, una semana después de la siembra, y se extendieron hasta el final del desarrollo fenológico del trigo. Respecto a las variables meteorológicas, la

temperatura y humedad relativa del aire se midieron mediante un sensor HMP50 (Vaisala Inc., Helsinki, Finland). La velocidad del viento se midió a través de un anemómetro modelo A100R (VectorInstruments Ltd., UK). La radiación solar y la radiación incidente de onda larga se midieron respectivamente con sensores CM14 y CG2 (Kipp & Zonen Delft, Holland). Finalmente también se registraron medidas de radiación neta con un sensor NR- (Kipp & Zonen, Delft, The Netherlands) instalado sobre el perímetro del lisímetro. Todos los datos se almacenaron cada 15 minutos, haciendo uso de un datalogger CR-1000 (Campbell Scientific Inc., Logan, USA), y posteriormente se promediaron a escala horaria y diaria.

### 3- Resultados y discusión

Una vez registrados y procesados todos los datos necesarios para aplicar el modelo descrito en Sánchez et al. (2014), se procedió al cálculo de todos los términos de la ecuación de balance de energía, y a su promediado a escala horaria. Los valores estimados de  $ET_c$ , entre  $-0,2$  y  $1,2 \text{ mm h}^{-1}$ , se compararon con los valores medidos en el lisímetro. En promedio se obtiene un error cuadrático medio (RMSE) de  $\pm 0,10 \text{ mm h}^{-1}$ , reforzado por una desviación sistemática (bias) prácticamente despreciable. Con el fin de observar la evolución de los valores diarios de  $ET_c$ , estimados y medidos, se ha elaborado la figura 2.

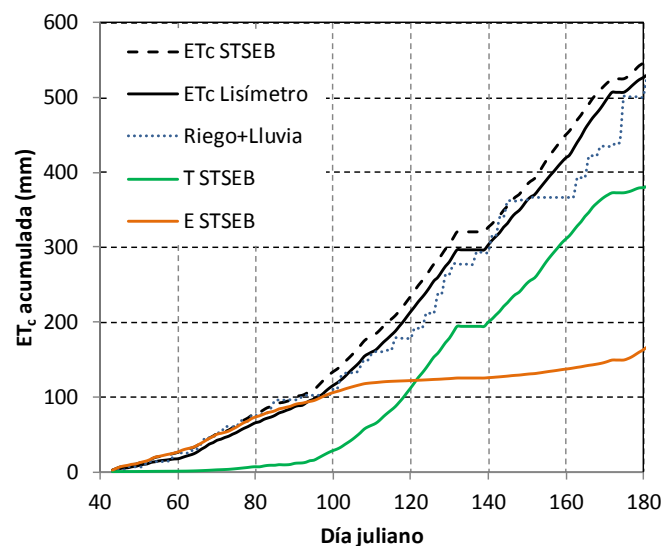


**Figura 2.** Evolución de los valores estimados y medidos de  $ET_c$  diaria para toda la campaña del trigo. También se incluye información de cantidades de lluvia y riego.

El promedio de  $ET_c$  diaria se sitúa por debajo de los  $3 \text{ mm d}^{-1}$  hasta finales de marzo, alcanzó su máximo a mediados de mayo con un pico entorno a los  $9 \text{ mm d}^{-1}$ , y fue descendiendo durante la fase de maduración hasta mediados de junio. En líneas generales, las estimaciones del modelo reproducen bastante bien los valores de  $ET_c$  medidos por el lisímetro a lo largo de toda la campaña, con la excepción de unos pocos días en los cuales se produjo algo de precipitación, y en las que hubo que recalcular las propias medidas del lisímetro. El análisis cuantitativo ofrece una ligera sobrestimación por parte del modelo de  $0,08 \text{ mm d}^{-1}$  con un RMSE de  $\pm 0,9 \text{ mm d}^{-1}$ , y un coeficiente de determinación ( $r^2$ ) de 0,863. Estos resultados están muy próximos a los obtenidos por ejemplo por otros autores. Si nos centramos en el cultivo del trigo, Zhang et al. (2013) obtuvieron unos valores de  $RMSE = \pm 0,6 \text{ mm d}^{-1}$  y  $r^2$  de 0,92. Un error muy similar de  $RMSE = \pm 0,4 \text{ mm d}^{-1}$ , se presenta en el trabajo de Gao et al. (2014). Por su parte, Zhang et al. (2015) obtuvieron una desviación media diaria de  $\pm 0,9 \text{ mm d}^{-1}$ .

Sumando los valores de  $ET_c$  diario, y calculando de esa forma el acumulado a lo largo del desarrollo del trigo, el valor total de evapotranspiración para toda la campaña predicho por el modelo es de 550 mm. Este valor resulta solo un 4% superior al medido directamente por el lisímetro, 530 mm (ver Figura 3). Es interesante destacar que el acuerdo entre los valores medidos y estimados es particularmente bueno para la primera fase de desarrollo del trigo ( $DOY < 90$ ), ya que estas condiciones de suelo desnudo o baja proporción de vegetación tradicionalmente suponen un desafío para los modelos de balance de energía, o de balance de agua en suelo.

Uno de los puntos fuertes del modelo empleado es que permite la partición de la  $ET_c$  total en sus componentes evaporativa y transpirativa. Así pues, se ha llevado a cabo dicha separación para este estudio sobre el trigo. La figura 3 incluye la evolución por separado de E y T. La evaporación domina claramente para coberturas de vegetación por debajo de 0,2 ( $DOY < 90$ ). El cociente T/E se va incrementando rápidamente, y la transpiración pasa a convertirse en la principal contribución a la  $ET_c$ . En términos cuantitativos, el total acumulado de E resultó ser de 166 mm, con aproximadamente dos terceras partes concentradas antes del  $DOY$  90. Por su parte, el total acumulado de T fue de 381 mm. Esto supone que un 30% del total acumulado de evapotranspiración del trigo corresponde a evaporación del suelo. Estos resultados están de acuerdo con trabajos previos relativos al cultivo del trigo. López-Urrea et al. (2009) obtuvieron una componente evaporativa del 24% (135 mm) del total de  $ET_c$ . Zhang et al. (2013) observaron que la evaporación del suelo suponía el 28% del total de  $ET_c$  para toda la campaña de desarrollo de un trigo de invierno. Sun et al. (2006) mostraron un 30-35%, y Sadras and Rodriguez (2010) un 22-34% para un trigo de invierno en Australia. Shahrokhnia and Sepaskhah (2013) emplearon micro-lisímetros para medir la evaporación del suelo y encontraron un valor entorno al 30% del total de  $ET_c$  del trigo.

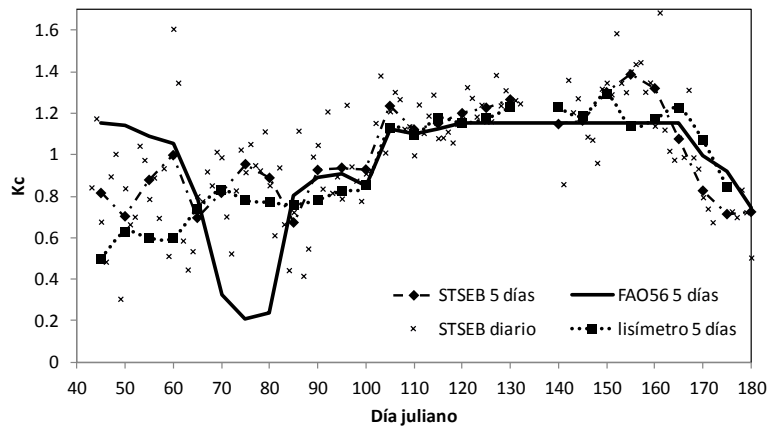


**Figura 3.** Valores acumulados de las estimaciones de  $ET_c$ , E, y T para toda la campaña del trigo, junto con los valores observados de  $ET_c$ , y la cantidad registrada de riego+lluvia.

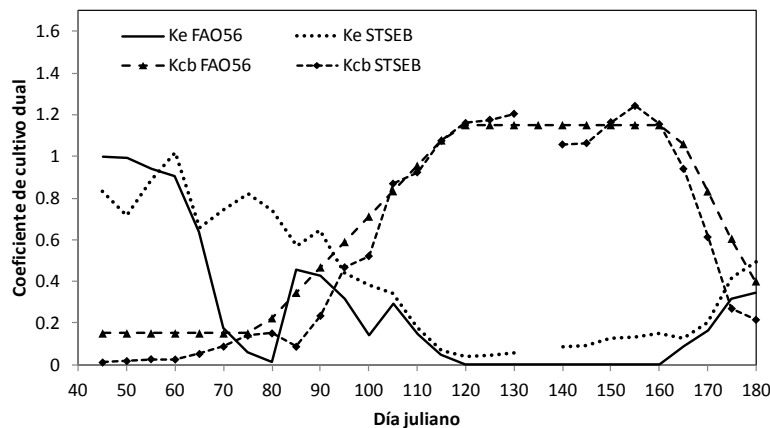
Para estimar los coeficientes de cultivo  $K_c$  se ha calculado el cociente entre las medidas de lisímetro, y las predicciones del modelo, con los valores de evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) calculados previamente siguiendo la ecuación de FAO-56 Penman-Monteith (Allen et al. 1998). Los resultados de  $K_c$  se muestran en la figura 4a. Los valores



representan promedios de 5 días para evitar la dispersión que introducen los eventos de riego. Los valores promedios obtenidos mediante el lisímetro son:  $K_{c-ini}$ : 0,67,  $K_{c-med}$ : 1,20 and  $K_{c-fin}$ : 0,41, mientras que los estimados a través de los cálculos del modelo son:  $K_{c-ini}$ : 0,84,  $K_{c-med}$ : 1,23 and  $K_{c-fin}$ : 0,50. Estos resultados están muy próximos a los obtenidos por López-Urrea et al. (2009) sobre un trigo en la misma zona, empleando medidas de lisímetro:  $K_{c-med}$ : 1,20 and  $K_{c-end}$ : 0,15. La diferencia en el valor de  $K_{c-fin}$  podría deberse a los valores más altos de  $ET_c$  al final de la fase de crecimiento en nuestras medidas, consecuencia del valor relativamente alto de  $P_v=0,23$  todavía reinante en el DOY 180. Otros autores han obtenido valores de 0,30-0,45 para  $K_{c-ini}$ , de 1,10-1,20 para  $K_{c-med}$ , y  $K_{c-fin}$  en el intervalo 0,25-0,45 (Gontia and Tiwari 2010; Kjaersgaard et al. 2008; Howell et al. 2006; Allen et al. 1998). Los valores de  $K_{c-med}$  son similares a nuestros promedios y las ligeras variaciones se pueden deber a diferencias en factores como: la fecha de siembra, la duración de las fases de desarrollo, la variedad del trigo, prácticas culturales y condiciones climáticas. Las diferencia en  $K_{c-ini}$  y  $K_{c-fin}$  puede deberse a los valores más altos de evaporación durante estas dos fases en nuestro experimento.



(a)



(b)

**Figura 4.** Comparación entre los valores de coeficientes de cultivo estimados a través del modelo, los calculados a partir de medidas del lisímetro, y los propuestos por FAO56: (a)  $K_c$ , (b)  $K_e$  and  $K_{cb}$

De una forma similar, procedimos al cálculo de los coeficientes de cultivo dual  $K_e$  y  $K_{cb}$  como los cocientes  $E/ET_0$  y  $T/ET_0$ , respectivamente. En la figura 4b se muestra la

comparación entre los resultados obtenidos y los valores propuestos por FAO-56. Todos ellos corresponden a valores promediados de 5 días. Durante las primeras fases de desarrollo del trigo se observan valores altos de  $K_e$  debido a los riegos frecuentes en esas fechas. Durante la fase de reproducción el  $K_{cb}$  aumentó rápidamente hasta alcanzar un pico de 1,20. Los valores promedio de  $K_{cb}$  obtenidos a través de los cálculos STSEB para cada fase resultaron:  $K_{cb\_ini}$ : 0,06,  $K_{cb\_med}$ : 1,13 y  $K_{cb\_fin}$ : 0,22. Los valores modelados de  $K_{cb\_ini}$  son más pequeños que los predichos por FAO-56, mientras que los estimados de  $K_{cb\_med}$  están muy próximos. En términos de  $K_e$ , FAO-56 subestima los valores modelados, principalmente al inicio de la fase de crecimiento. Conviene recordar que la metodología de FAO aplica una serie de parámetros y medidas de campo para predecir la evaporación del suelo, y utiliza algunas suposiciones que pueden conducir a ciertos errores. Además, el coeficiente  $K_e$  se ve altamente afectado por la estrategia de riego, el tipo de suelo, la cobertura de vegetación, y las condiciones meteorológicas locales. Zhang et al. (2013) estimaron los valores inicial, a mitad de temporada, y final de  $K_{cb}$  de 0,25, 1,15 y 0,30, respectivamente. Valores muy similares fueron publicados por Shahrokhnia and Sepaskhah (2013), 0,18-0,27, 1,11-1,16, y 0,11-0,14 para las distintas etapas de crecimiento. Gao et al. (2014) también obtuvieron resultados de  $K_{cb}$  entre 0,22-0,27, 1,02-1,10, y 0,25-0,43, para la fase inicial, intermedia, y final, respectivamente, en un campo de trigo con riego por aspersión. Todos estos valores de  $K_{cb\_med}$  y  $K_{cb\_fin}$  están de acuerdo con nuestras estimaciones, mientras que los de  $K_{cb\_ini}$  están claramente por encima de nuestro valor predicho promedio, seguramente debido a una mayor cobertura de vegetación durante la fase inicial de crecimiento en esos trabajos, como ya se mencionó anteriormente.

#### 4- Conclusiones

En este trabajo se muestra el potencial de las técnicas basadas en la combinación del balance de energía en superficie junto con temperaturas radiométricas para el cálculo de la evapotranspiración de cultivo. Nos centramos en una plantación de trigo de primavera situado en una zona semiárida del centro de la Península Ibérica, pero la metodología sería perfectamente aplicable a cualquier otra variedad de trigo, y bajo cualquier otro tipo de condiciones ambientales y climáticas. La comparación entre los valores estimados y medidos mediante lisímetro de pesada muestran un RMSE de  $\pm 0,9 \text{ mm d}^{-1}$ , en sintonía con algunos otros resultados previos usando la misma técnica sobre otros cultivos como el sorgo, el girasol, o la colza. Además, este error se mantiene para más del 80% de los 130 días de duración de este estudio, con independencia de las condiciones de cobertura de vegetación. La precisión del modelo mejora cuando se trata de calcular los valores acumulados para toda la temporada del trigo, con una desviación de tan solo el 4% (20 mm) sobre el total de los 530 mm medidos en el lisímetro. La separación de  $ET_c$  en sus componentes E y T muestra que el 30% del total de  $ET_c$  corresponde a la evaporación de agua desde el suelo, con la mayor parte concentrada en la fase inicial cuando los valores de cobertura de vegetación son todavía inferiores al 20%.

Con la metodología presentada también es posible calcular coeficientes de cultivo, único y dual. Los resultados de  $K_c$  están de acuerdo con los obtenidos a través de medidas de lisímetro, y con los valores de  $K_{cb}$  y  $K_e$  publicados por otros autores sobre trigo. Por tanto, esta técnica se podría emplear en el ajuste local de los valores de  $K_c$  propuestos por FAO, como una alternativa en aquellas plantaciones en las que no se disponga de lisímetros de pesada.

#### 5.- Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad a través de los proyectos CGL2013-46862-C2-1/2-P, y la Generalitat Valenciana con el



proyecto PROMETEUII/2014/086. Los autores quisieran agradecer al apoyo logístico en el mantenimiento de la instrumentación de Laura Martínez y Juan A. de la Vara.

## 6- Bibliografía

- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M (1998) Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements, in: Proceedings of the FAO Irrigation and Drainage Paper No.56. Roma, Italy
- Campos I, Neale CMU, Calera A, Balbontín C, González-Piqueras, J. (2010) Assessing satellite-based basal crop coefficients for irrigated grapes (*Vitis vinífera* L.). *Agricultural Water Management* 98:45–54
- Colaizzi PD, Kustas WP, Anderson, MC, Agam N, Tolk JA, Evett SR, Howell TA, Gowda PH, O’Shaughnessy SA (2012) Two-source energy balance model estimates of evapotranspiration using component and composite surface temperatures. *Adv Water Res* 50:134-151
- FAO (2014) FAO Statistical Database (online). Consultation: January 20, 2014. <http://faostat3.fao.org/home/E>
- French AN, Hunsaker DJ, Clarke TR, Fitzgerald GJ, Luckett WE, Pinter PJ. Energy balance estimation of evapotranspiration for wheat grown under variable management practices in Central Arizona. *Trans. ASABE* 2007, 50(6):2059-71
- Gao Y, Yang L, Shen X, Li X, Sun J, Duan A, Wu L (2014) Winter wheat with subsurface drip irrigation (SDI): Crop coefficients, water-use estimates, and effects of SDI on grain yield and water use efficiency. *Agr Water Manage* 146:1-10
- Howell TA, Schneider AD, Dusek DA, Marek TH, Steiner JL. Calibration and scale performance of Bushland weighing lysimeters. *Trans. ASAE*, 1995, 38(4):1019-24
- Howell TA, Evett SR, Tolk JA, Copeland KS, Dusek DA, Colaizzi PD (2006) Crop coefficients developed at Bushland, Texas for corn, wheat, sorghum, soybean, cotton, and alfalfa. In: *Proceeding of the World Environmental and Water Resources Congress*, Omaha, NE, p. 9.
- Howell TA, Evett SR, Tolk JA, Copeland KS, Marek TH (2012) Evapotranspiration and crop coefficients for irrigated sunflower in the Southern High Plains. *ASABE Paper No. 12-1338306*. St. Joseph, Mich.: ASABE
- Hunsaker DJ, Pinter Jr PJ, Kimball BA (2005) Wheat basal crop coefficients determined by normalized difference vegetation index *Irri Sci* 24(1):1-14
- Kjaersgaard JH, Plauborg FL, Mollerup M, Petersen CT, S. Hansen (2008) Crop Coefficients for winter wheat in a sub-humid climate regime. *Agric Water Manag* 95:918-924
- Kustas WP, Alfieri JG, Anderson MC, Colaizzi PD, Prueger JH, Evett SR, Neale CMU, French, AN, Hipps LE, Chávez JL, Copeland KS, Howell TA (2012) Evaluating the two-source energy balance model using local thermal and surface flux observations in a strongly advective irrigated agricultural area. *Adv Water Res* 50:120-133
- López-Urrea R, Martín de Santa Olalla F, Fabeiro C, Moratalla A (2006) Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate. *Agr Water Manage* 85:15–26
- López-Urrea, R, Montoro A, González-Piqueras J, López-Fuster P, and Fereres E (2009) Water use of spring wheat to raise water productivity. *Agr Water Manage* 96:1305–1310
- López-Urrea R, Montoro A, Mañas F, López-Fuster P, Fereres E (2012) Evapotranspiration and Crop Coefficients from Lysimeter Measurements of mature ‘Tempranillo’ wine grapes. *Agric Water Manage* 112:13-20
- López-Urrea R, Montoro A, Trout TJ (2014) Consumptive Water Use and Crop Coefficients of Irrigated Sunflower. *Irrig Sci* 32(2): 99-109



- MAGRAMA (2014) Anuario de Estadística 2013. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid. pp. 1095.
- Sadras VO, Rodriguez D (2010) Modelling the nitrogen-driven tradeoff between nitrogen utilisation efficiency and water use efficiency of wheat in eastern Australia. *Field Crops Res.* 118:297–305
- Sánchez JM, Kustas WP, Caselles V, Anderson M (2008) Modelling surface energy fluxes over maize using a two-source patch model and radiometric soil and canopy temperature observations. *Remote Sens Environ* 112:1130-1143
- Sánchez JM, López-Urrea R, Rubio E, Caselles V (2011) Determining water use of sorghum from two-source energy balance and radiometric temperatures. *Hydrol Earth Syst Sc* 15:3061-3070
- Sánchez JM, López-Urrea R, Rubio E, González-Piqueras J, Caselles V (2014) Assessing crop coefficients of sunflower and canola using two-source energy balance and thermal radiometry. *Agr Water Manage* 137:23-29
- Shahrokhnia MH, Sepaskhah AR (2013) Single and dual crop coefficient and crop evapotranspiration for wheat and maize in a semi-arid region. *Theor Appl Climatol*, 114:495-510
- Sun HY, Liu CM, Zhang XY, Shen YJ, Zhang YQ (2006) Effects of irrigation on water balance, yield and WUE of winter wheat in the North China Plain. *Agric Water Manag* 85:211–218
- Williams LE, Ayars JE (2005) Grapevine water use and the crop coefficient are linear functions of the shaded area measured beneath the canopy. *Agricultural and Forest Meteorology* 132:201–211:
- Zhang B, Liu Y, Xu D, Zhao N, Lei B, Rosa RD, Paredes P, Paço TA, Pereira LS (2013) The dual crop coefficient approach to estimate and partitioning evapotranspiration of the winter wheat-summer maize crop sequence in North China Plain. *Irrig Sci* 31:1303-1316
- Zhang S, Zhao H, Lei H, Shao H, Liu T (2015) Winter wheat productivity evaluated by the developed remote sensing evapotranspiration model in Hebei Plain, China. *The Scientific World Journal*, article ID 384086.



## ACLIMATACIÓN AL ESTRÉS HÍDRICO DE PLANTAS DE UVA DE MESA cv. CRIMSON SEEDLESS CULTIVADAS EN MACETA

Conesa, M.R. (1), de la Rosa, J.M. (2), Montemurro, L. (3), García, M. (4), Domingo, R. (5), Pérez-Pastor, A. (6)

<sup>1,2,3,4</sup> Becario de Investigación, Universidad Politécnica de Cartagena, Departamento de Producción Vegetal, Paseo Alfonso XIII, 48. 30203. (Cartagena), charo.conesa@upct.es, josemdlrs@hotmail.com, luca.montemurro@hotmail.it, manuel.garcia@upct.es

<sup>5,6</sup> Dr. Profesor, Universidad Politécnica de Cartagena, Departamento de Producción Vegetal, Paseo Alfonso XIII, 48. 30203. (Cartagena), rafael.domingo@upct.es, alex.perez-pastor@upct.es

### Resumen

El objetivo de este estudio fue evaluar la capacidad de adaptación al estrés hídrico de uva de mesa cv. *Crimson Seedless* x *Paulsen 1103* cultivadas en maceta bajo invernadero. Se aplicaron 5 tratamientos de riego: (i) CTL-1 y CTL-2; regados diariamente a capacidad de campo; (ii) RD, regado al 50% del CTL-1; (iii) PRD<sub>FIX</sub>, regado al 50% del CTL-1 en una maceta de forma fija, y (iv) PRD<sub>ALT</sub> regado al 50% del CTL-1, en una maceta de forma alterna. Transcurridos 30 días desde su aplicación, se suprimió el riego durante 7 días a excepción de CTL-1. Posteriormente se reanuda el riego, y todas las plantas fueron tratadas como CTL-1 durante 7 días. El comportamiento estomático de *Crimson* se caracterizó como isohídrico, dado que reducciones de  $g_s$  por debajo de  $40 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , mantuvieron valores de  $\Psi_{t,md}$  dentro de un rango constante. Las condiciones de déficit hídrico afectaron severamente a las plantas de los tratamientos PRD<sub>FIX</sub> y CTL-2, dado que, independientemente de la recuperación observada en los valores de  $g_s$  y  $A_{CO_2}$ , los daños generados sobre su crecimiento vegetativo resultaron ser irreversibles. PRD<sub>ALT</sub> y RD pueden ser utilizados con fines de programación de riegos.

### 1.- Introducción

La demanda internacional de uva de mesa apirena, se ha incrementado en los últimos años. Sin embargo, su cultivo en zonas mediterráneas obliga a adoptar nuevas estrategias de riego que permitan reducir el consumo de agua sin afectar negativamente a su producción (Conesa et al., 2014). El conocimiento de los mecanismos de tolerancia al déficit y la capacidad de los cultivos para experimentar aclimataciones, resulta de gran interés en la confección de estos programas. Por tanto, para su correcta aplicación, resulta necesario conocer la respuesta fisiológica de las plantas al déficit hídrico. En general, la vid es considerada una especie que evita el estrés hídrico con un control estomático estricto (Schultz, 2003, Chaves et al., 2010). Sin embargo, algunas variedades han mostrado un control más estricto que otras, lo que ha llevado a clasificar las variedades de vides como isohídricas o anisohídricas (Tardieu y Simonneau, 1998; Lovisolo et al., 2010). Un comportamiento isohídrico proviene de una fuerte regulación estomática de la transpiración, lo que produce un potencial de hoja casi constante. Al contrario, especies anisohídricas, poseen un menor control estomático de la transpiración, produciendo una reducción del potencial hídrico foliar de acuerdo al estado energético del agua en el suelo y demanda climática (Conesa et al., 2013).

Numerosas investigaciones han resaltado la importancia que ejerce el nivel de estrés hídrico en la hoja sobre las propiedades estructurales e intercambio gaseoso de la vid (Chaves et al., 2010; Romero et al., 2014). Sin embargo, en uva de mesa, el impacto que



ejerce la aclimatación de las plantas al déficit hídrico en este intercambio, está poco documentado. El objetivo de este trabajo fue comprobar la capacidad de adaptación (endurecimiento) y tolerancia a la sequía de la uva de mesa ante diferentes niveles de estrés hídrico.

## 2.- Materiales y métodos

### *Condiciones experimentales*

El ensayo se realizó bajo invernadero en la Estación Experimental Agroalimentaria 'Tomás Ferro' de la ETSIA-UPCT, situada en la Palma, (Murcia), durante el verano de 2014. Los plantones de uva de mesa cv. Crimson Seedless fueron injertados en vivero sobre patrón Paulsen 1103 y trasplantados a macetas de 5 litros sobre sustrato de fibra de coco. Se seleccionaron 9 plantas por tratamiento de similar desarrollo y aspecto (75 cm de altura y 1 cm de diámetro de tronco). Al inicio del experimento, el sistema radicular de todas las plantas se dividió en dos mitades (cada mitad en una maceta), a fin de mantener similares condiciones experimentales (Fig. 1). La radiación fotosintéticamente activa, temperatura del aire y humedad relativa (RFA,  $T_a$  y HR) fueron registradas en una estación climática instalada dentro del invernadero. A partir de  $T_a$  y HR se calculó el DPV. El sistema de riego consistió en una hilera de plantas con un emisor por maceta de  $2 \text{ L h}^{-1}$  (2 emisores planta<sup>-1</sup>).



**Figura 1.** Distribución de macetas dentro del invernadero

### *Periodos de riego y tratamientos*

Todas las plantas se regaron diariamente durante 30 días con idénticas dosis de agua y solución nutritiva vegetativa. Posteriormente, se establecieron 5 tratamientos de riego de acuerdo a un diseño experimental al azar de 3 repeticiones por tratamiento: (i) CTL-1 y CTL-2, ambos regados diariamente a condiciones de humedad de suelo correspondiente a capacidad de campo ( $\Theta_{cc} \approx 28 \%$ ), excepto las plantas del tratamiento CTL-2 que fueron sometidas al período de estrés y posterior recuperación; (ii) Riego deficitario (RD), dosis equivalente al 50% del CTL-1; (iii) Riego fijo por desecación parcial de raíces (PRD<sub>FIX</sub>), dosis equivalente al 50% del CTL-1, aplicado en una maceta de forma fija. (iv) Riego alterno por desecación parcial de raíces (PRD<sub>ALT</sub>), dosis equivalente al 50% del CTL-1, aplicado en una maceta. La alternancia se realizó, cuando el contenido de agua en el suelo ( $\Theta_v$ ) de la maceta sin riego se reducía al 12% (correspondiente al punto de marchitez). Estos tratamientos se aplicaron durante 1 mes (*periodo de endurecimiento*) e inmediatamente después, se suprimió el riego durante 7 días en todos los tratamientos (*periodo de estrés*), a excepción del tratamiento CTL-1, que se mantuvo regado en las condiciones iniciales. Finalizado el periodo de estrés, todas las plantas fueron tratadas como las plantas CTL-1, con riego diario (*periodo de recuperación*).

### *Medidas realizadas*



El estado hídrico de las plantas fue evaluado en 6 hojas sanas por tratamiento de riego, a partir del potencial hídrico de tallo a mediodía ( $\Psi_{t,md}$ , entre las 12:00 y las 13.30 hora solar) y antes del alba ( $\Psi_{pd}$ , entre las 5:00 y 6:30 hora solar) con cámara de presión (Soil moisture Equipment Corp., Model 3000), siguiendo las recomendaciones de Hsiao (1990). El contenido volumétrico de agua en el suelo ( $\Theta_v$ ) fue determinado a partir de sondas GS3 (Decagon Devices Inc.) colocadas a 20 cm de profundidad en 3 plantas por tratamiento. Los parámetros de intercambio gaseoso (i) conductancia estomática máxima ( $g_{sm}$ ), (ii) asimilación neta de  $CO_2$ , ( $A_{im}$ ) y (iii) eficiencia instantánea de uso del agua (WUE,  $g\ CO_2/g\ H_2O$  transpirada) se determinaron con un medidor portátil CIRAS-2 en condiciones de saturación (radiación fotosintéticamente activa,  $PAR \approx 1500\ mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$ , concentración de  $CO_2 \approx 380\ ppm$  y temperatura foliar  $\approx 30\ ^\circ C$ ). La temperatura del dosel vegetal se determinó con una pistola de infrarrojos digital (Model GM320) en las mismas hojas donde se obtuvieron los parámetros de intercambio gaseoso. A partir de los valores de  $T_f$  y  $T_a$ , se calculó el índice de estrés hídrico (CWSI) aplicando la fórmula de Idso et al. (1981):

$$CWSI = \frac{(dT - dTl)}{dT_u - dTl} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:  $dT$  es la diferencia entre la temperatura del aire ( $T_a$ ) y de la hoja ( $T_f$ ) expresado como  $(T_f - T_a)$ ,  $dT_u$  es el límite superior de la diferencia de temperatura  $(T_f - T_a)$ , y  $dTl$  es el límite inferior de  $T_f - T_a$ . Los valores de CWSI varían entre 0 y 1, donde 0 indicaría condiciones de riego adecuado y 1 condiciones de estrés máximo, y en consecuencia menor transpiración soportada por las plantas.

La epinastía, evaluada durante el periodo de endurecimiento como el cambio en el ángulo de inserción foliar (AIF), fue medida a mediodía solar con un transportador de ángulos transparente, en diez hojas por planta y 3 plantas por tratamiento. Por último al final del periodo de estrés/recuperación se evaluó el crecimiento vegetativo mediante un estudio visual de la calidad de las plantas. Para ello se establecieron 4 categorías, que fueron expresadas en porcentaje: 1) plantas en condiciones ideales, 2) plantas en condiciones aceptables, 3) plantas con daños moderados, 4) plantas con daños severos.

#### *Análisis estadístico*

El análisis de varianza (ANOVA) se realizó con el programa SPSS versión 13.0 para Windows, así como la prueba de comparación múltiple de Duncan, al nivel de confianza del 95%.

### **3.- Resultados y discusión**

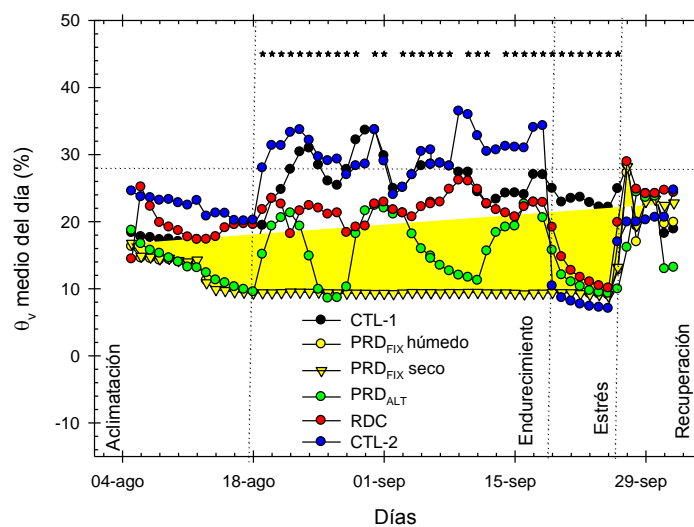
#### *Periodo de endurecimiento*

Los valores medios de DPV a mediodía fueron de 2.78 kPa durante el periodo de endurecimiento, mientras que RFA y  $T_a$  promediaron valores de  $770\ W\ m^{-2}$  y  $33.1\ ^\circ C$ , respectivamente. El tratamiento CTL-1 mantuvo valores de  $\Theta_v$  próximos a capacidad de campo ( $\approx 30\%$ ) a lo largo del experimento, indicando que su suministro hídrico fue adecuado (Conesa et al., 2014). Por su parte, los tratamientos RD, PRD<sub>FIX</sub> y PRD<sub>ALT</sub> mostraron valores medios de  $\Theta_v$  un 27, 55 y 50% más bajos que CTL-1 (Fig. 2).

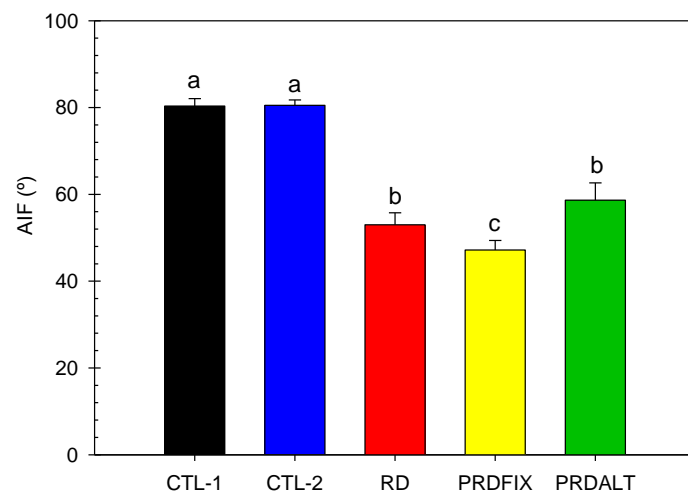
PRD<sub>FIX</sub> recibió la misma cantidad de agua que PRD<sub>ALT</sub> y RD. Sin embargo, los resultados de  $\Theta_v$  en PRD<sub>FIX</sub> mostraron un importante agotamiento de agua en el suelo, llegando a valores medios de humedad volumétrica de 10.2 y 14.3 %, en el lado húmedo y seco, respectivamente. Por tanto, aunque el riego fue el mismo (misma dosis y frecuencia), el agotamiento en el suelo de PRD<sub>FIX</sub> se produjo antes en la zona mojada que en PRD<sub>ALT</sub> y

RD; de forma que, valores de  $\Theta_v$  a lo largo del día más bajos después del riego, generaron valores medios de  $\Theta_v$  del día más bajos que RD y PRD<sub>ALT</sub>. Dodd et al. (2008) observaron en girasol, una reducción de la fracción de flujo de savia cuando se alcanzaron niveles de  $\Theta_v$  inferiores al 16% en el lado seco de PRD, limitando así la concentración de ácido abscísico (ABA) que es transportado vía xilema hacia las hojas.

A pesar de las diferencias descritas anteriormente en  $\Theta_v$ , todos los tratamientos deficitarios desarrollaron a nivel de planta, déficit hídricos moderados y similares entre sí, según indican los valores de potencial hídrico foliar antes del alba ( $\Psi_{pd} \sim -0.12$  MPa) (Tabla 1).  $\Psi_{t,md}$  presentó una tendencia similar a  $\Psi_{pd}$  tal y como se muestra en la correlación encontrada [ $\Psi_{pd} = -1.86 - 0.58 \Psi_{t,md}$ ;  $r^2 = 0,67^{***}$ ]. De forma similar a lo observado para  $\Psi_{pd}$ , en todos los tratamientos sometidos a déficit hídrico durante el periodo de endurecimiento, se produjo una reducción drástica del ángulo de inserción foliar (AIF) siendo significativamente más acusada en el tratamiento PRD<sub>FIX</sub> (Fig. 3).



**Figura 2.** Valores medios de contenido volumétrico de agua en el suelo ( $\Theta_v$ ). Cada punto corresponde a la media de de 3 sondas por tratamiento. Notar que, el tratamiento PRD<sub>FIX</sub> estaba monitorizado con 3 sondas tanto en el lado seco, como en el lado húmedo. Las líneas de puntos delimitan los periodos de riego. Los asteriscos indican diferencias significativas de los tratamientos deficitarios respecto a CTL-1.



**Figura 3.** Valores promedio del ángulo de inserción foliar (AIF) durante el periodo de endurecimiento en cada uno de los tratamientos de riego ensayados. Cada barra representa la media  $\pm$  error estándar de 30 hojas por tratamiento.

**Tabla 1.** Valores medios de los parámetros medidos del potencial hídrico de tallo a mediodía ( $\Psi_{t,md}$ ), potencial hídrico al alba ( $\Psi_{pd}$ ), asimilación neta de  $CO_2$  ( $A_{CO_2}$ ), conductancia estomática ( $g_s$ ), eficiencia instantánea de uso del agua (WUE) y diferencia de temperatura entre la hoja y el aire ( $T_f-T_a$ ) durante el periodo de endurecimiento (End.), estrés (E) y recuperación (R).

		End.	E	R			End.	E	R
$\Psi_{t,md}$	CTL-1	-0.62 a <sup>z</sup>	-0.61 a	-0.69	$\Psi_{pd}$	CTL-1	-0.04 a	-0.10 a	-0.12
	CTL-2	-0.62 a	-1.55 bc	-0.65		CTL-2	-0.04 a	-1.15 bc	-0.50
	RD	-0.81 b	-1.46 b	-0.71		RD	-0.12 b	-1.02 b	-0.37
	PRD <sub>ALT</sub>	-0.74 b	-1.43 b	-0.74		PRD <sub>ALT</sub>	-0.13 b	-1.13 b	-0.57
	PRD <sub>FIX</sub>	-0.74 b	-1.77 c	-0.67		PRD <sub>FIX</sub>	-0.13 b	-1.52 c	-0.47
<b>ANOVA</b>		0.022	0.027	N.S	<b>ANOVA</b>		0.019	0.035	N.S
$A_{CO_2}$	CTL-1	5.50 a	6.38 a	8.16	$g_s$	CTL-1	101.65 a	124.42 a	163.75
	CTL-2	5.08 a	2.10 b	5.1		CTL-2	91.32 ab	60.83 b	148.33
	RD	4.99 ab	1.55 b	5.33		RD	77.00 b	45.83 b	119
	PRD <sub>ALT</sub>	4.23 ab	1.28 b	5.63		PRD <sub>ALT</sub>	71.47 b	41.08 b	125.92
	PRD <sub>FIX</sub>	3.49 b	1.76 b	5.57		PRD <sub>FIX</sub>	74.67 b	60.08 b	158.42
<b>ANOVA</b>		0.031	0.027	N.S	<b>ANOVA</b>		0.019	0.035	N.S
WUE	CTL-1	60.05	57.7	51.17	$T_f-T_a$	CTL-1	0.15	-0.65	-1.09
	CTL-2	62.73	47.11	37.6		CTL-2	-0.14	1.43	-0.13
	RD	67.17	40.73	58.26		RD	1.51	1.98	0.85
	PRD <sub>ALT</sub>	51.2	40.62	44.67		PRD <sub>ALT</sub>	2.02	2.35	0.9
	PRD <sub>FIX</sub>	62.04	44.32	42.39		PRD <sub>FIX</sub>	2.29	2.28	0.99
<b>ANOVA</b>		N.S	N.S	N.S	<b>ANOVA</b>		0.038	NS	N.S

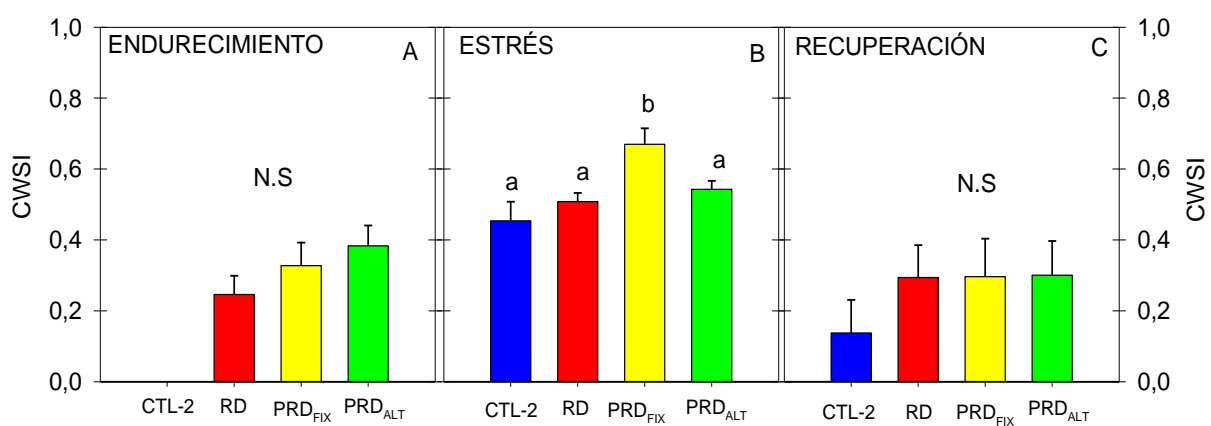
<sup>z</sup> Letras diferentes en cada columna indican diferencias significativas entre tratamientos según test de Duncan ( $P < 0.05$ ). N.S indica diferencias no significativas entre tratamientos.

Durante el periodo de endurecimiento,  $g_{sm}$  se redujo significativamente por el efecto del estrés hídrico en los tratamientos deficitarios (RD, PRD<sub>FIX</sub> y PRD<sub>ALT</sub>) respecto a CTL-1 (Tabla 1). Sin embargo, los niveles de  $A_{CO_2}$  sólo disminuyeron significativamente en PRD<sub>FIX</sub>, confirmando que ante niveles de déficit moderado, las plantas limitan las pérdidas por transpiración, manteniendo su productividad foliar (Ruiz-Sánchez et al. 2000). Por otra parte, los niveles medios de la diferencia de temperatura entre la hoja y el aire ( $T_f-T_a$ ), mostraron como las vides control mantuvieron sus hojas unos  $\sim 3$  °C por debajo de la temperatura ambiental ( $T_a$ ), lo que indica una alta capacidad de refrigeración, que proporciona niveles adecuados de transpiración (Ruiz-Sánchez et al. 2000).

#### Periodo de estrés/recuperación

Los valores medios de DPV a mediodía fueron de 2.06 kPa durante el periodo de estrés/recuperación, mientras que RFA y  $T_a$  promediaron valores de 368,5 W m<sup>-2</sup> y 29.2°C respectivamente. Tras 7 días de supresión del riego (a excepción de CTL-1, que se mantuvo regado en las condiciones iniciales), el nivel de  $\Theta_v$  fue muy bajo y similar en todos los tratamientos (en torno a 10 %, Figura 2). Atendiendo a los niveles de  $\Psi_{pd}$ , las plantas del

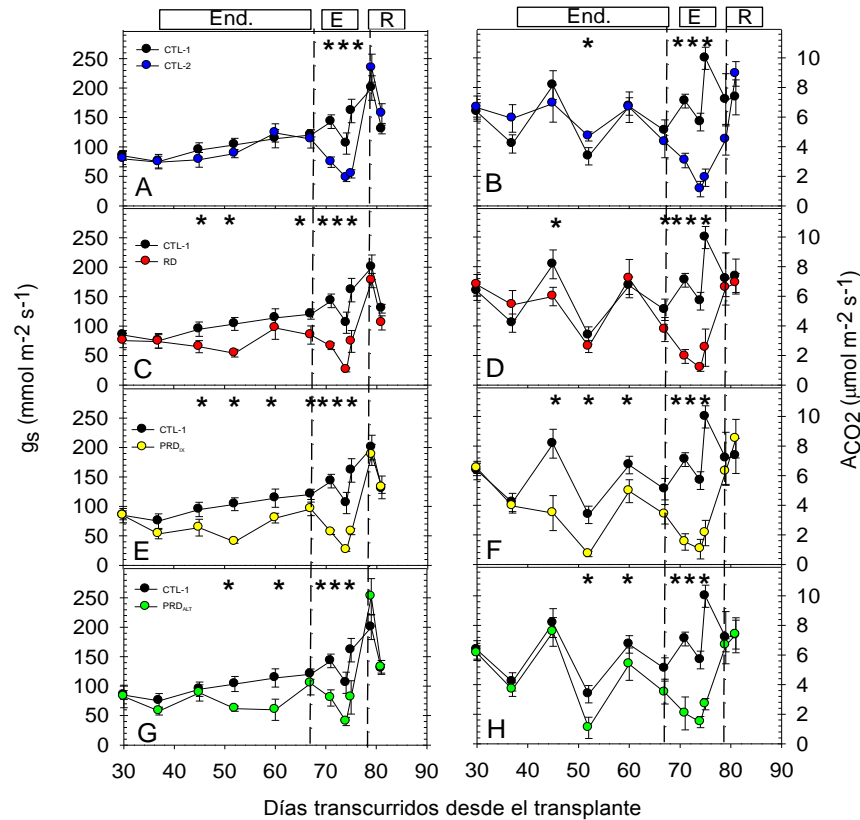
tratamiento CTL-2 y de PRD<sub>FIX</sub>, alcanzaron niveles de estrés hídrico significativamente más altos, mientras que RD y PRD presentaron niveles moderados (Tabla 1). Además, se observó un efecto positivo del déficit hídrico sobre WUE, con valores absolutos más elevados en RD (Tabla 1). Las condiciones de estrés hídrico aumentaron la diferencia de temperatura entre la hoja y el aire ( $T_f - T_a$ ), indicando que dicho valor aumenta progresivamente cuando la humedad del suelo comienza a ser limitante, por lo que puede ser utilizado como índice de estimación del estado hídrico (Bellvert et al., 2015). Asimismo, los valores de  $g_s$  y  $A_{CO_2}$  en los tratamientos deficitarios evaluados, sufrieron una disminución drástica durante la fase de estrés (Tabla 1). En este sentido, CSWI mostró valores más cercanos a la unidad en PRD<sub>FIX</sub>, seguidos de PRD<sub>ALT</sub> y RD. Garrot et al. (1990), observaron en 'Flame Seedless' que bajo condiciones de CSWI  $\sim 0.20$  se obtuvo un incremento en el peso de bayas, mientras que para valores de CSWI  $\sim 0.60$  se observó una fuerte disminución de la producción (Fig. 4).



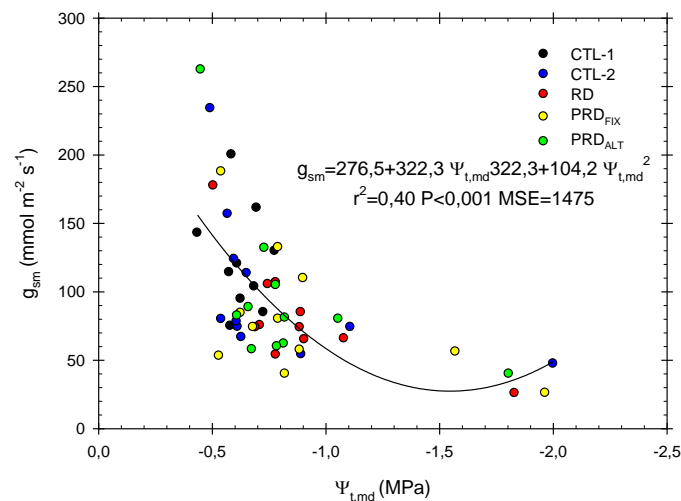
**Figura 4.** Valores promedio del índice de estrés hídrico del cultivo (CSWI) durante los periodos de: (A), endurecimiento; (B), estrés y (C) recuperación. Cada barra representa la media  $\pm$  error estándar de 18 hojas por tratamiento.

Tras la reanudación del riego, la recuperación de los parámetros hídricos estudiados se produjo de forma progresiva, indicando que la influencia negativa del déficit hídrico puede ser reversible (Egea et al. 2012). Cabe señalar, que la recuperación de  $g_s$  y  $A_{CO_2}$  fue ligeramente más rápida en el tratamiento CTL-2 (Fig. 5), debido a que durante el período de estrés, estas plantas sufrieron un mayor grado de defoliación, mecanismo que permite a las plantas reducir la superficie transpirante (mecanismo de evitación a la sequía). Al considerar el conjunto de valores de  $g_s$  y  $A_{CO_2}$  se observó una estrecha correlación lineal ( $A_{CO_2} = 38.83 + 9.84 g_s$ ;  $r^2 = 0.58^{***}$ ). Este hecho sugiere una limitación de la capacidad fotosintética bajo condiciones de estrés hídrico e indica que existe una elevada influencia entre  $g_s$  y la actividad fotosintética (Egea et al., 2012). Por otra parte, la relación curvilínea encontrada entre  $g_s$  y  $\Psi_{t,md}$  (Fig. 6), mostró que a partir una reducción de  $g_s$  próxima a  $40 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ,  $\Psi_{t,md}$  se mantuvo dentro de un rango constante ( $\Psi_{t,md} \sim -1.25 \text{ MPa}$ ). Esta regulación de la transpiración, caracteriza a Crimson como isohídrica, que comparado con el comportamiento de variedades anisohídricas, demuestra mayor tolerancia a la sequía a través de (Lovisol et al. 2010): (i) aumento de la eficiencia instantánea del uso del agua (WUE), (ii) mayor sensibilidad de los estomas al incremento del DPV, (iii) menor conductancia hidráulica y menor vulnerabilidad a la cavitación. Domec y Johnson, (2012) postularon que los comportamientos isohídricos y anisohídricos en condiciones de riego adecuado o estrés hídrico pueden ser explicados a partir de diferencias en la conductividad hidráulica de la planta ( $K_p$ ) a medida que varía el DPV. Además, es posible que una combinación de ambas señales (hidráulicas y hormonales), como  $K_p$  y el ABA, permita a algunas especies cambiar de comportamiento de isohídrico a anisohídrico y viceversa. Es por tanto necesario señalar,

que el comportamiento que una variedad puede mostrar durante un experimento está sometido a varias condiciones que modifican este comportamiento, tales como: las condiciones climáticas y edáficas, el déficit hídrico, y el hecho de que la planta haya crecido en el campo o dentro de un invernadero.

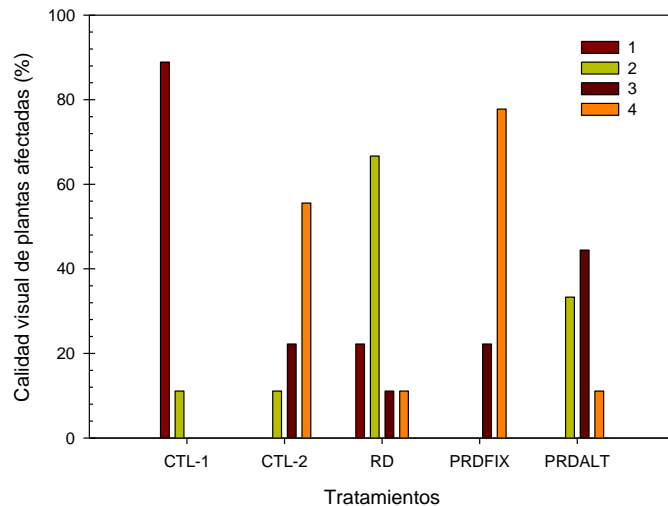


**Figura 5.** Niveles de conductancia estomática ( $g_s$ ) y asimilación neta de  $\text{CO}_2$  ( $A_{\text{CO}_2}$ ) durante los periodos de endurecimiento (End.), estrés (E) y recuperación (R) en los distintos tratamientos de riego (CTL-2, RD, PRD<sub>ALT</sub> y PRD<sub>FIX</sub>). Los valores corresponden a la media  $\pm$  error estándar de 18 hojas por tratamiento. Los asteriscos indican diferencias significativas respecto a CTL-1.



**Figura 6.** Relación entre potencial hídrico de tallo ( $\Psi_{t,md}$ ) y la conductancia estomática ( $g_{sm}$ ) en los distintos tratamientos de riego (CTL-1, CTL-2, RD, PRD<sub>ALT</sub> y PRD<sub>FIX</sub>). Cada punto representa la media  $\pm$  error estándar de 18 hojas por tratamiento.

En último lugar, la calidad visual de las plantas evaluadas al final del experimento, mostró daños más severos en los tratamientos PRD<sub>FIX</sub> y CTL-2, inducidos por un mayor grado de defoliación, consecuencia del periodo de supresión del riego (Fig. 7).



**Figura 7.** Calidad visual de plantas afectadas al final del experimento en cada tratamiento de riego (siendo: Categoría 1= calidad aceptable → Categoría 4= daños severos). Cada barra representa la media ± error estándar de 9 plantas por tratamiento de riego.

#### 4.- Conclusiones y recomendaciones

El comportamiento estomático de Crimson se clasificó como isohídrico, ya que una reducción de  $g_s$  por debajo de  $40 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , mantuvo valores constantes de  $\Psi_{t,md}$ . Su respuesta fisiológica, resultó severamente afectada por los tratamientos PRD<sub>FIX</sub> y CTL-2, ya que a pesar de presentar una recuperación de los intercambios gaseosos, los daños generados sobre su aspecto visual y crecimiento vegetativo resultaron ser irreversibles. Sin embargo, las estrategias de PRD<sub>ALT</sub> y RD mostraron mecanismos de adaptación a la sequía, pudiendo ser utilizadas con fines de programación de riegos.

#### 5.- Agradecimientos

El presente trabajo se ha realizado con ayuda de fondos del proyecto (AGL-2010-19201- C04-04) financiado por el ministerio de Educación y Ciencia. Conesa MR, disfrutó de una ayuda del programa de formación de profesorado universitario (FPU).

#### 6.- Bibliografía

Bellvert, J., Marsal, H., Girona, J., Zarco-Tejada, P.J. (2015). Seasonal evolution of crop water stress index in grapevine varieties determined with high-resolution remote sensing thermal imagery. *Irrigation Science*, 33: 81–93.

Chaves, M.M., Zarrouk, O., Francisco, R., Costa, J.M., Santos, T., Regalado, A.P., Rodrigues, M.L., Lopes, C.M. (2010). Grapevine under deficit irrigation – hints from physiological and molecular data. *Annals of Botany*, 105: 661–676.





Conesa, M.R., Pérez-Pastor, A., de la Rosa, J.M., Robles, J.M., Domingo, R., García-Salinas, M.D. (2013). Sensibilidad estomática de 'Crimson Seedless' al déficit hídrico. VI Jornadas de Introducción a la Investigación de la UPCT. pp 61–63.

Conesa, M.R., de la Rosa, J.M., Artés-Hernández, F., Dodd, I.C., Domingo, R., Pérez-Pastor, A. (2014). Long-term impact of deficit irrigation on the physical quality of berries in 'Crimson Seedless' table grapes. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. (*In press*) DOI 10.1002/jsfa.6983.

Dodd I.C., Egea G., Davies W.J. (2008) Abscisic acid signaling when soil moisture is heterogeneous: decreased photoperiod sap flow from drying roots limits abscisic acid export to the shoots. *Plant, Cell and Environment*, 31:1263–1274.

Domec, J.C. y Johnson, D.M. (2012). Does homeostasis or disturbance of homeostasis in minimum leaf water potential explain the isohydric versus anisohydric behaviour of *Vitis vinifera* L. cultivars? *Tree physiology*, 00: 1-4. Commentary.

Egea, G., González-Real, M.M., Baille, A., Nortes, P.A., Conesa, M.R., RuizSalleres, I. (2012). Effects of water stress on irradiance acclimation of leaf traits in almond trees. *Tree Physiology*, 32:450–463.

Garrot, D.J., Fangmeier, D.D., Husman, S.H. (1990). Irrigation scheduling using the crop water stress index in Arizona. In: *Visions of the Future—Proceedings of the Third National Irrigation Symposium*, St. Josephs, MI, ASAE. (pp 281–286).

Idso, S.B., Jackson, R.D., Pinter Jr., P.J., Reginato, R.J., Hatfield, J.L. (1981). Normalizing the stress degree day for environmental variability. *Agricultural Meteorology*. 24: 45–55.

Lovisolò, C., Perrone, I., Carra, A., Ferrandino, A., Flexas, J., Medrano, H., Schubert, A. (2010). Drought induced changes in development and function of grapevine (*Vitis* spp.) organs and their hydraulic and non-hydraulic interaction at their whole-plant level: a physiological and molecular update. *Functional Plant Biology*, 37:98–16.

Romero, P., Pérez-Pérez. J.G., Del Amor, F., Martínez-Cutillas, A., Dodd, I.C., Botía, P. (2014). Partial root zone drying exerts different physiological responses on field-grown grapevine (*Vitis vinifera* cv. Monastrell) in comparison to regulated deficit irrigation. *Functional Plant Biology*, 41(11): 1087–110.

Ruiz-Sanchez, M.C., Domingo, R., Torrecillas, A., y Perez-Pastor, A. (2000). Water stress preconditioning to improve drought resistance in young apricot plants. *Plant Science*, 156: 245–251.

Schultz, H.R. (2003). Differences in hydraulic architecture account for near isohydric and anisohydric behaviour of two field grown *Vitis vinifera* L. cultivars during drought. *Plant, Cell and Environment*, 26(8):1393–1405.

Tardieu, F y Simonneau, T. (1998). Variability among species of stomatal control under fluctuating soil water status and evaporative demand: modelling isohydric and anisohydric behaviors. *Journal of Experimental Botany*, 49:419–432.



## EVALUACIÓN DE LA PROGRAMACIÓN DEL RIEGO EN UNA COMUNIDAD DE REGANTES MEDIANTE BALANCE DE ENERGIA CON IMÁGENES LANDSAT 8

*Jiménez-Bello, M.A. (1)(P), Martínez Alzamora, F. (2), Martínez Gimeno, M.A. (3), Intrigliolo, D.S. (4)*

<sup>1</sup>Investigador de la Universitat Politècnica de València, Instituto Universitario de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, Camino de Vera, s/n 46022 Valencia. [mijibar@dihma.upv.es](mailto:mijibar@dihma.upv.es)

<sup>2</sup>Catedrático de la Universitat Politècnica de València, Instituto Universitario de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, Camino de Vera, s/n 46022 Valencia. [fmartine@hma.upv.es](mailto:fmartine@hma.upv.es)

<sup>3</sup>Becaria Formación Profesorado Universitario. Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Campus Universitario de Espinardo 30100, Espinardo, Murcia [mamargi8@etsia.upv.es](mailto:mamargi8@etsia.upv.es)

<sup>4</sup>Científico Titular. Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Campus Universitario de Espinardo 30100, Espinardo, Murcia [dintri@cebas.csic.es](mailto:dintri@cebas.csic.es)

### Resumen

El modelo para el cálculo de la evapotranspiración (ET) por balance de energía a nivel del suelo (SEBAL), una vez ha sido parametrizado para cítricos (Jiménez-Bello et al. 2015), ha sido aplicado a una comunidad de regantes durante la campaña de riego 2014. Entre las parcelas regadas se han seleccionado 22 y se han comparado mensualmente los ratios de la ET calculada mediante la metodología FAO ( $ET_{FAO}$ ), que lo hace para un cultivo sin limitaciones de agua en el suelo, y la ET calculada con SEBAL ( $ET_{SEBAL}$ ) frente al ratio de  $ET_{FAO}$  y los volúmenes aportados a cada parcela (VOL).

Se ha determinado la tendencia lineal y potencial de la comparación de  $ET_{SEBAL} ET_{FAO}^{-1}$  con  $ET_{FAO} Vol^{-1}$ . En todos los meses ha existido correlación positiva de los datos para las dos tendencias, lo que viene a demostrar que  $ET_{SEBAL}$  en cultivos estresados es menor que  $ET_{FAO}$ . El modelo potencial ha mostrado mejores coeficientes de determinación, puesto que en cultivos sobregados llega un límite en el que no se produce más ET y al percolar el agua, ésta no queda recogida en el balance de energía superficial.

A falta de una investigación más detallada de cómo puede afectar el tamaño y la cubierta vegetal de la parcela, SEBAL es una metodología que puede ser utilizada para la estimación de las necesidades de riego en cítricos en comunidades de regantes.

### Abstract

Surface Energy Balance Algorithms for Land (SEBAL) parametrized for citrus (Jiménez-Bello et al. 2015) was applied to an irrigation district during the irrigation season 2014. 22 irrigated orchards were selected and monthly ratios of ET calculated by FAO methodology ( $ET_{FAO}$ ), with no soil water limitations, and calculated ET by SEBAL ( $ET_{SEBAL}$ ) were compared to the ratio of  $ET_{FAO}$  and supplied volumes to each orchard (VOL).



Linear and potential trends of  $ET_{SEBAL} ET_{FAO}^{-1}$  compared to  $ET_{FAO} Vol^{-1}$  were determined. In every month there was a positive correlation for the two trends, showing that  $ET_{SEBAL}$  in stressed crops is lower than  $ET_{FAO}$ . The potential trend has shown best determination coefficients, since for overirrigated crops water percolates and is not registered in the surface energy balance model.

Instead of further research is needed to know how pixel size and vegetation cover affect  $ET_{SEBAL}$ , SEBAL is a methodology that can be used to estimate citrus water requirements for large irrigation districts,

## 1 Introducción

La evapotranspiración (ET) es un componente clave del balance hidrológico. Desde el punto de vista del uso del agua en la agricultura, la determinación precisa de la ET de un cultivo es fundamental para hacer una gestión eficiente.

Diversas herramientas y modelos para la estimación de la ET han sido propuestos (Rana y Katerji 2000). Entre ellos, el más empleado es el formulado por la FAO (Allen et al. 1998), el cual tiene en cuenta variables climáticas incluidas en la evapotranspiración de referencia ( $ET_o$ ) y el tipo de cultivo contemplado en un coeficiente de cultivo ( $K_c$ ). La estimación de la evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ) se calcula como el producto de  $ET_o$  por  $K_c$ . Sin embargo, en cultivos altos y con una cubierta vegetal discontinua con un alto grado de acoplamiento con la atmósfera,  $K_c$  puede cambiar dependiendo de las condiciones climáticas locales (Annandale y Stockle 1994; Ballester et al. 2013) y la cantidad de vegetación, altura y densidad (Allen y Pereira 2009). Es por ello importante determinar la posibilidad de usar otras alternativas para estimar la  $ET_c$  de un cultivo leñoso.

La determinación de la transpiración de un árbol mediante sensores de flujo de savia ha sido uno de los métodos más utilizados (Dragoni et al. 2005; Ballester et al. 2013). Además, esta técnica sólo permite determinar el uso de agua de un limitado número de árboles (Smith y Allen 1996). Por lo tanto existen muchas incertidumbres cuando se extrapola la información puntual de un solo árbol a grandes áreas, debido a la gran variabilidad existente entre árboles de una misma parcela comercial. Para extrapolar información puntual a otras escalas como parcelas, zonas de riego o cuencas hidrográficas, se requiere de información espacial. Diferentes metodologías basadas en información obtenida mediante sensores transportados en distintas plataformas se han utilizado para el cálculo de la  $ET_c$  (Kalma et al. 2008).

Una de las metodologías utilizadas para el cálculo de la ET mediante teledetección es determinar el calor latente como un componente residual del balance de energía que se produce a nivel del suelo. Para ello se calcula el calor sensible a partir de la temperatura radiométrica de la superficie obtenida de la banda térmica de las imágenes.

Moran et al. (1994) y Gillies et al. (1997) estudiaron la relación entre la superficie de la temperatura y el Índice Normalizado de Vegetación (NDVI), dado que la transpiración depende de la cantidad de cubierta vegetal. Kustas y Normam (1996) concluyeron que las metodologías más prometedoras era la combinación de la temperatura superficial y de los índices de vegetación o aquellos modelos que acoplaban el de la capa límite atmosférica junto la variación de la temperatura superficial.

Bastiaanssen et al. (1998) desarrollaron *Surface Energy Balance Algorithms for Land (SEBAL)*, un algoritmo calibrado que utiliza imágenes de satélite mediante el modelado



inverso de dos condiciones extremas (pixel caliente y pixel frío) y que realiza estimaciones del flujo de calor sensible y elimina desviaciones sistemáticas producidas en la estimación de la radiación neta, del flujo de calor del suelo, la temperatura radiométrica y de la resistencia aerodinámica del aire.

La aplicación de SEBAL requiere la utilización de sensores que dispongan de banda en el infrarrojo térmico. Sin embargo, los satélites que incorporan este tipo de tecnología tienen una resolución espacial muy pequeña para la gestión del riego, especialmente en zonas donde el tamaño de la parcela es reducido como ocurre en algunas zonas del mediterráneo de España. Además cuando el paso de los satélites es poco frecuente, la disponibilidad de las imágenes queda restringida a estas fechas, siempre que las condiciones de nubosidad lo permitan.

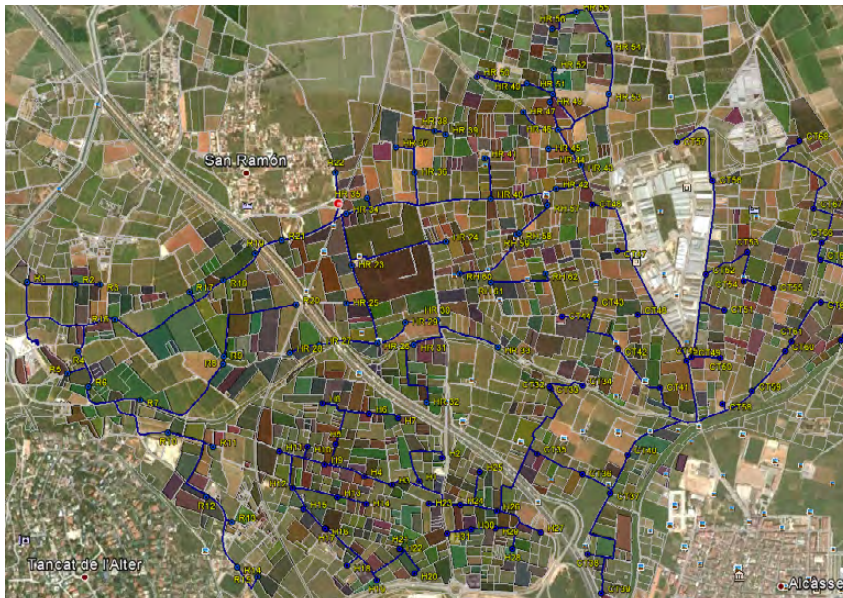
Otra limitación es que la ET instantánea ( $ET_{inst}$ ), obtenida cuando el satélite pasa, tiene que ser extrapolada a valores diarios para poder emplear la información obtenida para la programación del riego en parcela. El escalado a valores diarios se realiza generalmente asumiendo la conservación de un factor de escala, como la fracción evaporativa (Crago y Brutsaert 1996) o el ratio entre la  $ET_c$  y la  $ET_o$  (Allen et al. 2007). Sin embargo Ferguson et al. (2010) identificaron la suposición de este ratio como constante, como la mayor fuente de incertidumbre en la estimación de flujos de energía mediante teledetección, particularmente para sistemas agrícolas con un bajo grado de acoplamiento con la atmósfera alrededor existente (Jarvis 1985). Este es el caso de los cítricos, un cultivo perenne que regula los estomas bajo cambios en las condiciones medioambientales, fundamentalmente por el déficit de presión de vapor, resultando en un  $K_c$  variable a lo largo del día (Kriedemann 1986).

En este trabajo se presenta la aplicación de la parametrización de SEBAL para cítricos durante una campaña de riego, previamente validada comparando los resultados con los obtenidos a partir de una torre de Covarianza de Torbellinos (Jiménez-Bello et al 2015), en una comunidad de regantes de la provincia de Valencia. Las imágenes empleadas han sido del satélite Landsat 8.

## 2 Metodología

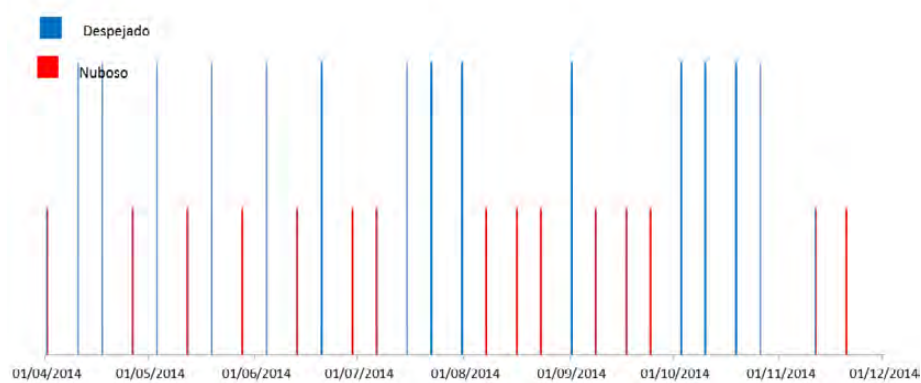
### 2.1 Caso de estudio

El caso de estudio es el Sector XI de Picassent en Valencia (España; 39° 22' 43" N, 0° 28' 20" W) donde en la actualidad se riegan 307 ha, en su mayoría cítricos, con un tamaño medio de las parcelas de 3600 m<sup>2</sup>. La Figura 1 muestra el caso de estudio compuesto por dos redes de distribución que funcionan de manera independiente abastecidas por una balsa de regulación.



**Figura 1** Sector XI, Picassent (Valencia)

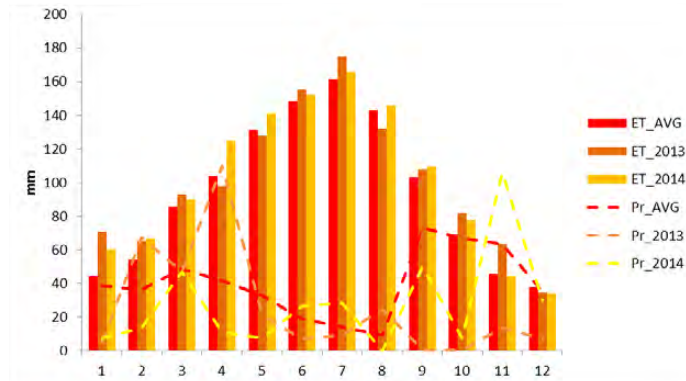
14 imágenes de las 28 disponibles desde el mes de Abril a Noviembre fueron procesadas mediante la aplicación de SEBAL al estar libres de nubes en la zona de estudio (Figura 2).



**Figura 2** Imágenes disponibles entre los meses de Abril y Noviembre de 2014 donde se indica la nubosidad en la zona de estudio.

La Figura 3 muestra la  $ET_0$  y la precipitación ( $Pr$ ) del año 2013 y 2014 y la media de los últimos 10 años.





**Figura 3** Evapotranspiración de referencia (ET\_AVG, ET\_2013; ET\_2014) y precipitación (Pr\_AVG, Pr\_2013; Pr\_2014) para los últimos 10 años y los años 2013 y 2014.

## 2.2 Cálculo de necesidades de riego mediante SEBAL

SEBAL calcula ET como el residuo de la ecuación del balance de energía

$$LE = R_n - G - H \quad (1)$$

donde LE es el calor latente de la energía consumida por la evapotranspiración,  $R_n$  es la radiación neta, G es el calor sensible transmitido al suelo y H es el calor sensible transmitido por calor al aire, todo en  $W m^{-2}$ .  $R_n$  fue calculado como en Allen et al. (2011). Para el cálculo de G fue adoptado la fórmula empírica propuesta por Bastiaansen (2000), la cual estima el ratio  $G R_n^{-1}$  próximo al medio día como:

$$\frac{G}{R_n} = \frac{T_s}{\alpha} (0.0038 \cdot \alpha + 0.0074 \cdot \alpha^2) \cdot (1 - 0.98 \cdot NDVI^4) \quad (2)$$

donde  $T_s$  es la temperatura de la superficie (K) y  $\alpha$  es el albedo superficial

H se calcula a partir de una ecuación aerodinámica

$$H = \frac{(\rho \cdot c_p \cdot dT)}{r_{ah,1,2}} \quad (3)$$

donde  $\rho$  es la densidad del aire ( $kg m^{-3}$ ),  $C_p$  es el calor específico del aire a presión constante ( $1004 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ) y  $r_{ah,1,2}$  es la resistencia aerodinámica ( $s m^{-1}$ ) entre dos alturas cercanas a la superficie,  $z_1$  y  $z_2$  (generalmente 0.1 y 2 m) sobre la altura del plano de desplazamiento 0 calculada como la función de la resistencia aerodinámica para cada uno de los píxeles de forma individual.  $dT$  (K) es la diferencia de temperaturas entre dos alturas  $z_1$  y  $z_2$  (Allen et al. 2011).  $dT$  se asume que es lineal y proporcional a  $T_s$  como Bastiaansen (1995) empíricamente probó:

$$dT = b + a \cdot T_s \quad (4)$$

Puesto que existen dos variables desconocidas en (3),  $dt$  y  $r_{ah}$ , se lleva a cabo un proceso de calibración interna. Con este fin se seleccionan dos píxeles extremos que representan una superficies agrícola muy seca y húmeda, respectivamente (Allen et al., 2011).



Como píxel frío se seleccionó un lago cercano, donde se asumió que  $dT$  era 0, suponiendo que la temperatura del aire era igual a  $T_s$  y  $H$  era 0. El límite superior de la función  $dT$  se estima a partir de un píxel caliente donde se asume que el suelo está lo suficientemente seco de forma que  $LE=0$ .

$$dT_{hot} = \rho_{airhot} \cdot C_p \frac{(R_n - G)}{r_{ahhot}} \quad (5)$$

donde  $r_{ahhot}$  es  $r_{ah}$  calculada para la rugosidad y condiciones de estabilidad del píxel caliente. La selección del píxel caliente fue realizada manualmente por medio de ortofotos de alta resolución. El píxel caliente fue cambiando a lo largo de la sesión si la presencia de vegetación era detectada mediante el análisis del valor del NDVI.

$r_{ah}$  ha sido calculada para las parcelas de cítricos aplicando una relación entre la longitud de la rugosidad para la transferencia del momento ( $z_{om}$ ) y la altura del cultivo ( $h$ ) de 0,19 obtenida a partir de datos de Covarianza de Torbellinos (Jiménez-Bello et al. 2015). La altura de los cultivos se ha estimado mediante LIDAR, relacionándola con la cubierta vegetal (GC) obtenida mediante ortofotos correspondientes en el tiempo (Jiménez-Bello et al 2012). Posteriormente se ha remuestreado al tamaño de píxel de Landsat 8 tomando la media más la desviación estándar. Como píxel frío se ha seleccionado un lago próximo. La evapotranspiración instantánea ha sido escalada mediante dos métodos:

- a) El coeficiente de cultivo calculado en el momento de la toma de la imagen ( $Kc_{inst}$ ) se mantiene constante a lo largo del día.

$$Kc_{inst} = \frac{ET_{inst}}{ET_{oinst}} \quad (6)$$

- b) La relación entre la evapotranspiración instantánea y la radiación observada ( $R_s$ ) cuando pasa el satélite, es la misma que la evapotranspiración de cultivo y la radiación observada diaria.

$$ET_{SolRad} = \frac{1}{n} \sum_{d=1}^n \frac{1800 \cdot ET_{inst}(t_d)}{SF_d(t_d)} \quad (7)$$

Tomando como factor de escala ( $SF_d$ )

$$SF_d = \frac{1800 \cdot R_s(t)}{\int_d R_s(t) dt} \quad (8)$$

Donde 1800 es el número de segundos en 30 minutos

### 2.3 Cálculo de necesidades de riego mediante método FAO

La metodología adoptada fue la propuesta por Castel (2000) en la que se relaciona  $k_c$  con GC tal como se indica en la Tabla 1. El  $K_c$  obtenido se asume que es para un cultivo sin restricción de agua en el suelo.

**Tabla 1:** Coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) según la cubierta vegetal (GC, %) para cítricos

GC (%)	Relación $K_c$ -GC
$20 > GC$	$K_c = 0.021 + GC * 0.0174$
$20 < GC < 70$	$K_c = 0.274 + GC * 0.005$
$70 < GC$	$K_c = K_{c70}$

A su vez  $K_c$  es corregido dependiendo de la época del año como se indica en la Tabla 2.

**Tabla 2:** Factor de corrección mensual del  $K_c$  dependiente del mes del año.

kc medio si A>70	$f_{mes}$												
	Ene	Febr	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
$K_{c70}$	0,647	0,97	0,96	0,97	0,91	0,81	0,91	1,00	1,16	1,09	1,24	1,07	0,93

GC fue extraída mediante técnicas de análisis de imágenes como se describe en Jiménez-Bello et al. (2012)

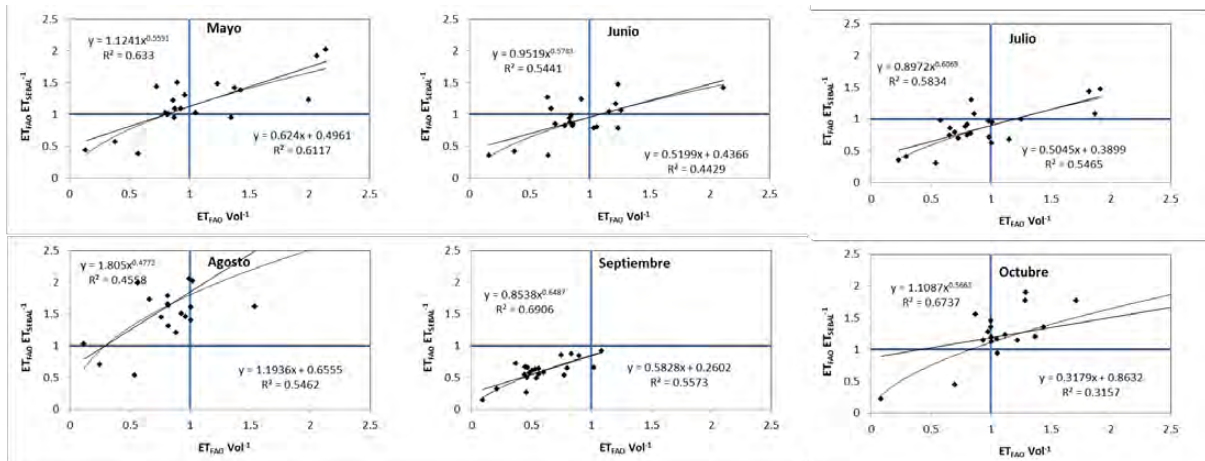
## 2.4 Validación de los resultados

Para validar los resultados se han comparado la ET calculada con SEBAL ( $ET_{SEBAL}$ , mm) en parcelas dónde se han estimado la evapotranspiración ( $ET_{FAO}$ , mm) tal como se ha descrito anteriormente. El grado de estrés hídrico de cada una de las parcelas se ha determinado comparando la  $ET_{FAO}$  con los volúmenes realmente aportados (Vol, mm) mediante el indicador  $ET_{FAO} Vol^{-1}$ . Cuando  $ET_{FAO} Vol^{-1} > 1$ , se asume que el cultivo está recibiendo menos agua de la requerida, siendo mayor el estrés cuanto mayor es el valor de este indicador. De modo contrario, cuando  $ET_{FAO} Vol^{-1} < 1$ , se asume que el cultivo está recibiendo más agua de la estimada.

Un total de 22 parcelas, desde 0,3 a 3,5 ha, fueron seleccionadas con la garantía de que la superficie registrada estaba medida por el contador asignado. Para los meses de Mayo a Octubre se han comparado estos indicadores para las 22 parcelas y se ha determinado la curva de tendencia asumiendo un modelo lineal y potencial. Los métodos de interpolación de  $ET_{inst}$ , han sido los descritos en la sección 2.2.

## 3 Resultados

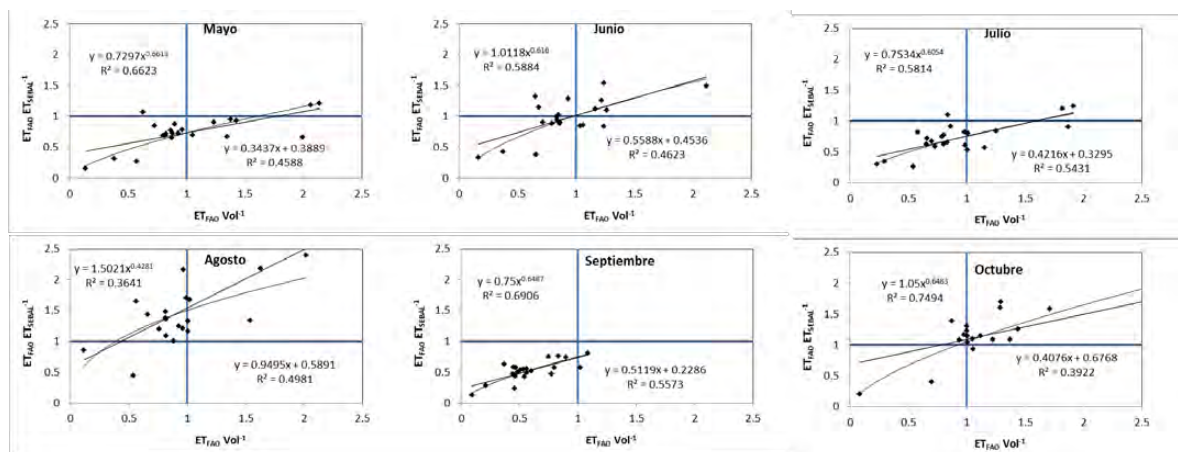
La Figura 4 muestra los resultados de comparar  $ET_{SEBAL} ET_{FAO}^{-1}$  con  $ET_{FAO} Vol^{-1}$  para los meses de Mayo a Octubre del año 2014. Los valores interpolados se obtuvieron asumiendo  $E_c$  (7). Se observa que para todos los meses existe una tendencia lineal con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) máximo para el mes de Mayo ( $R^2=0.61$ ) y mínimo para el mes de Octubre ( $R^2=0.31$ ). Asumiendo la interpolación de los resultados por el método de escalado del coeficiente de cultivo constante ( $E_c$  6), los resultados son similares siendo el mejor  $R^2$  para Septiembre ( $R^2= 0.56$ ) y el peor para Octubre ( $R^2=0.40$ ). Esta linealidad indica que  $ET_{SEBAL}$  fue menor que  $ET_{FAO}$  cuando el cultivo estaba estresado y mayor cuando el cultivo estaba regado en exceso, lo que viene a indicar que  $ET_{SEBAL}$  calcula la evapotranspiración real del cultivo, siendo útil para detectar a nivel de comunidad de regantes qué parcelas están regadas por exceso y cuales por defecto.



**Figura 4** Comparación de  $ET_{SEBAL} ET_{FAO}^{-1}$  con  $ET_{FAO} Vol^{-1}$  para los meses de Mayo a octubre de las 22 parcelas seleccionadas.  $ET_{SEBAL}$  ha sido obtenida asumiendo que la relación entre la evapotranspiración instantánea y la radiación observada cuando pasa el satélite es la misma que la evapotranspiración de cultivo y la radiación observada diaria. Los métodos de interpolación mostrados son el lineal y el potencial y el coeficiente de determinación  $R^2$ .

El modelo potencial muestra en general mejores  $R^2$  que el lineal con un máximo  $R^2$  de 0.69 (Septiembre) y 0.75 (Octubre), para los dos métodos de interpolación de la  $ET_{inst}$  y mínimos de 0.32 (Octubre) y 0.36 (Agosto). Este hecho se debe a que cuando el cultivo está sobregado ( $ET_{FAO} Vol^{-1} < 0.5$ ), el agua percola, por lo que no es recogido en el balance energético ( $Ec = 1$ ). De este modo, pese a que  $ET_{FAO} Vol^{-1}$  disminuya,  $ET_{SEBAL}$  permanece constante, lo que justifica que el modelo potencial se ajuste mejor que el lineal. Santos et al. (2010) observaron el mismo fenómeno aplicando una variante de SEBAL (METRIC) en parcelas de olivo.

Se observa que en el mes de Octubre, la mayoría de las parcelas han sufrido estrés y en Septiembre por lo contrario han sido regadas en exceso. Este hecho se puede explicar porque en Septiembre de 2014, la pluviometría fue mayor de lo normal y en Octubre sucedió lo contrario, tal como se observa en la Figura 3. No obstante los factores de corrección experimentales para el mes de Septiembre y Octubre están determinados para condiciones normales de pluviometría, por lo que se adapta mejor un método de balance de energía como SEBAL, que no está basado en datos empíricos locales.



**Figura 5** Comparación de  $ET_{SEBAL} ET_{FAO}^{-1}$  con  $ET_{FAO} Vol^{-1}$  para los meses de Mayo a octubre de las 22 parcelas seleccionadas.  $ET_{SEBAL}$  ha sido calculada por el método de escalado del



coeficiente de cultivo constante. Los métodos de interpolación mostrados son el lineal y el potencial y el coeficiente de determinación  $R^2$ .

#### 4 Conclusiones

A falta de una investigación más detallada de cómo puede afectar el tamaño y la cubierta vegetal de la parcela, SEBAL es una metodología que puede ser utilizada para la estimación de las necesidades de riego en cítricos en comunidades de regantes.

Es capaz de detectar aquellas parcelas que sufren estrés al calcular la evapotranspiración real del cultivo. Junto con los modelos basados en indicadores de vegetación como Castel (2000) y los registros de los contadores de las parcelas, permite la realización de mapas de indicadores de estrés hídrico. Además el cálculo de la ET sobre grandes regiones, como en el caso de la Comunidad Valenciana con 150.000 ha de cítricos, permitiría mejorar el uso del agua del riego.

#### Agradecimientos.

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto FIGARO del Séptimo Programa Marco europeo. Los autores agradecen la ayuda proporcionada por el personal del Sector XI de Picassent.

#### Bibliografía

Allen R G, Pereira LS, Raes D, Smith M (1998) Crop evapotranspiration. Guide lines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, Rome, Italy.

Allen R G, Tasumi M, Morse A, Trezza R, Wright J L , Bastiaanssen W, Kramber W, Lorite I J, Robison C W (2007a) Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—applications. *J. Irrig. Drain. Eng. ASCE* 133 (4), 395–406.  
Annandale J G, Stockle C O (1994) Fluctuation of crop evapotranspiration coefficients with weather. A sensitivity analysis. *Irr. Sci.* 15,1-7.

Allen R G, Irmak A, Trezza R , Hendrickx J M H, Bastiaanssen W, Kjaersgaard J (2011) Satellite-based ET estimation in agriculture using SEBAL and METRIC. *J. Hydrolog. Process.* 25,4011–4027.

Ballester C, Castel J, Testi L, Intrigliolo D S, Castel J R (2013) Can heat-pulse sap flow measurements be used as continuous water stress indicators of citrus trees? *Irrigat. Sci.* DOI: 10.1007/s00271-012-0386-5.

Bastiaanssen W G M (1995) Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain: a remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climates. PhD Diss., CIP Data Koninklijke Bibliotheek, Den Haag, the Netherlands; 273.

Castel, J.R., 2000. Water use of developing citrus canopies in Valencia, Spain. *Proceeding International Society Citriculture, IX Congress*:223-226.

Crago R D, Brutsaert W (1996) A daytime evaporation and the self-preserve of the evaporative fraction and the Bowen ratio. *J. Hydrol.* 178, 241–255.



Dragoni D, Lakso A N, Piccioni R M (2005) Transpiration of Apple trees in a humid climate using heat pulse sap flow gauges calibrated with whole-canopy gas Exchange chambers. *Agr. For. Meteorol.* 130,85-94.

Ferguson C. R., Sheffield J., Wood E.F. and Gao H. (2010) Quantifying uncertainty in a remote sensing-based estimate of evapotranspiration over continental USA, *Int J Remote Sens.* 31:14, 3821-3865.

Gillies R T, Carlson T N, Cui J, Kustas W P, Humes K S (1997) A verification of the “triangle” method for obtaining surface soil water content and energy fluxes from remote measurements of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and surface radiant temperatures. *Int. J. Remote Sens.* 18 (15), 3145–3166.

Jarvis P G (1985) Coupling of transpiration to the atmosphere in horticultural crops: the omega factor. *Acta Horticult.* 171, 187–205.

Jiménez-Bello M.Á, Ruiz L.Á, Hermosilla T, Recio J, Intrigliolo D.S (2012). Use of remote sensing and geographic information tools for irrigation management of citrus trees. chapter Use of remote sensing and geographic information tools for irrigation management of citrus trees:147-160; CIHEAM., ISBN: 2-85352-482-5.

Jiménez-Bello M.A., Castel J.R.; Luca T., Intrigliolo D.S. (2015). Assessment of a remote sensing energy balance methodology (SEBAL) using different interpolation methods to determine evapotranspiration in a citrus orchard. *IEEE J-STARS.* DOI: 10.1109/JSTARS.2015.2418817

Kalma J D, MacVicar T R, McCabe M F (2008) Estimating land surface evaporation:a review of methods using remotely sensed surface temperature data. *Surv. Geophys.*, doi:10.1007/s10712-008-9037-z.

Kustas W P, Li F, Jackson T J, Prueger J H, MacPherson J I, Wolde M (2004) Effects of remote sensing pixel resolution on modeled energy flux variability of croplands in Iowa. *Remote Sens. Environ.* 92,535–547.

Moran M S, Clarke T R, Inouem Y, Vidal A (1994) Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sens. Environ.* 49, 246–263.

Rana G, Katerji N (2000) Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. *Eur. J. Agron.* 13 (2/3), 125–153.

Santos, C, Lorite, IJ, Tasumi, M, Allen, RG, Fereres, E (2010) Performance assessment of an irrigation scheme using indicators determined with remote sensing techniques. *Irrig Sci* 28: pp. 461-477





## PREDICCIÓN DE LAS NECESIDADES HÍDRICAS CON UNA SEMANA DE ANTELACIÓN MEDIANTE TELEDETECCIÓN Y METEOROLOGÍA EN LA FINCA EXPERIMENTAL CENTER PARA CULTIVOS DE MAÍZ.

*Garrido-Rubio, J. (1) (P), González Gómez, L. (1), Arellano Alcazar, I. (1), Madurga del Cura, C. (2), Navarro Comalrena de Sobregrau, M. (3), López Tapia, J. (3) Calera Belmonte, A. (4)*

<sup>1</sup> Ingeniero Agrónomo, Sección de Teledetección y SIG, Instituto de Desarrollo Regional, Universidad de Castilla-La Mancha, C. Campus Universitario s/n 02071, Albacete, España. [Jesus.Garrido@uclm.es](mailto:Jesus.Garrido@uclm.es); [Laura.Gonzalez@uclm.es](mailto:Laura.Gonzalez@uclm.es); [Irene.Arellano@uclm.es](mailto:Irene.Arellano@uclm.es)

<sup>2</sup> Responsable Asistencia Técnica CENTER, Grupo Tragsa – SEPI, C/ Maldonado, 58, 28006, Madrid, España. [cmadurga@tragsa.es](mailto:cmadurga@tragsa.es)

<sup>3</sup> Subdirección General de Regadíos y Economía del Agua (SGRYEA), Dirección General de Desarrollo Rural y Política Forestal (DGDRPF), Secretaría General de Agricultura y Alimentación, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. C/ Gran Vía de San Francisco, 28005, Madrid, España. [mnaomal@magrama.es](mailto:mnaomal@magrama.es); [jltapia@magrama.es](mailto:jltapia@magrama.es)

<sup>4</sup> Director, Sección de Teledetección y SIG, Instituto de Desarrollo Regional, Universidad de Castilla-La Mancha, C. Campus Universitario s/n 02071, Albacete, España. [Alfonso.Calera@uclm.es](mailto:Alfonso.Calera@uclm.es)

### Resumen

Determinar las necesidades hídricas que los cultivos demandarán a corto plazo juega un papel fundamental en la gestión de explotaciones agrícolas de regadío. De su precisión depende la obtención de mejores rendimientos productivos, económicos y medioambientales. La experiencia llevada a cabo en la finca experimental de la DGDRPF – CENTER del MAGRAMA, obtuvo la predicción de las necesidades hídricas con una semana de antelación durante todo el periodo de monitorización. Basados en la ecuación del coeficiente de cultivo único ( $K_c$ ), de la metodología FAO56, se predijo la evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ) en parcelas de maíz en regadío. Para ello, se emplearon técnicas meteorológicas que predijeron la evapotranspiración de referencia ( $ET_o$ ), y técnicas de teledetección basadas en secuencias temporales de índices de vegetación (IV) mediante las cuales se predijo el  $K_c$ . Los resultados obtenidos produjeron una ligera sobre estimación de la  $ET_c$  a final de campaña (8%). Paralelamente, los riegos aplicados fueron validados externamente mediante el empleo de sondas de humedad. En resumen, la experiencia proporcionó resultados adecuados con un bajo número de recursos. Así, la programación del riego se realizó mediante la combinación de técnicas de teledetección y meteorológicas.

### 1- Introducción

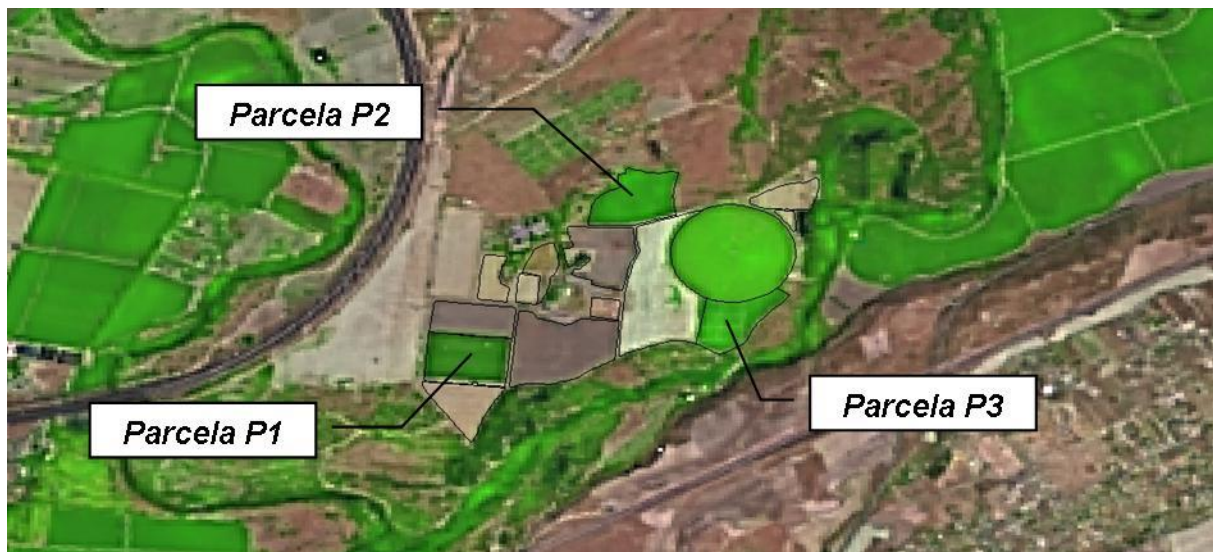
La planificación del riego a la escala temporal de una semana es un aspecto de gran interés en el manejo de los cultivos por parte de los agricultores, pues permite la planificación de la aplicación de agua de riego de forma óptima teniendo en cuenta la disponibilidad de agua, del sistema de riego, y otros factores como la tarificación eléctrica, etc... Para ello, es necesario estimar las necesidades de agua del cultivo con una semana de antelación. Dado que las necesidades de agua se pueden calcular como el producto del  $K_c$  y la  $ET_o$ , ambos parámetros deben ser estimados con el horizonte temporal señalado.



Actualmente, la metodología más extendida para su estimación es mediante el producto  $K_c$ , extraído de valores tabulados normalmente zonificados, y la  $ET_o$ , determinada mediante estaciones meteorológicas. Sin embargo, hoy en día, la teledetección presenta un estado de madurez óptimo para monitorizar cultivos debido a la frecuencia de visita de los satélites y su consiguiente generación de series temporales de imágenes multispectrales. Consecuentemente, mediante productos derivados de dichas imágenes se obtienen los índices de vegetación, los cuales pueden ser relacionados de forma lineal con los  $K_c$ . Por tanto, mediante el presente trabajo se da un paso más en la monitorización de cultivos y se muestra la metodología empleada en obtener la predicción de sus necesidades hídricas para la semana siguiente. Para ello, se realiza la predicción semanal tanto del  $K_c$  derivado de imágenes de satélite, como de la  $ET_o$  derivada de las temperaturas previstas. La experiencia tuvo lugar durante la campaña de verano 2014 sobre cultivos de maíz en la finca experimental de la DGDRPF – CENTER, donde semanalmente se facilitó la predicción de las necesidades hídricas con la que programar el riego.

## 2- Descripción

La experiencia tuvo lugar en la finca experimental del CENTER (San Fernando de Henares, Madrid), sobre 3 parcelas en regadío bajo diferentes sistemas de riego y cultivadas con maíz. Las características de las parcelas y los cultivos quedan recogidas en la siguiente Figura 1 de localización y en la Tabla 1 de descripción.



**Figura 1.** Vista general de las parcelas del CENTER monitorizadas durante la experiencia, usando una imagen RGB Landsat 8 con fecha 05 de Agosto de 2014.

**Tabla 1.** Características de las parcelas empleadas en la experiencia

Parcela	Superficie cultivada (ha)	Densidad de siembra (uds./ha)	Sistema de riego	Fecha de siembra	Fecha de cosecha	Sonda de humedad
P1	6,00	95.000	Gravedad	10 Mayo	30 Octubre	Si
P2	6,38	95.000	Aspersión	8 Mayo	31 Octubre	Si
P3	5,80	95.000	Aspersión	29 Abril	31 Octubre	No

El periodo de monitorización tuvo lugar desde el 18 de junio al 2 de octubre del 2014. Durante este tiempo se proporcionó una ficha semanal con la predicción de las necesidades

hídricas de la siguiente semana, de tal forma que fuese posible la programación de los riegos a 7 días vista. Dichas fichas contenían por parcela la predicción de la  $ET_o$ , la extrapolación del  $K_c$  y la determinación de las necesidades hídricas o  $ET_c$ . Recaltar que estas necesidades no contemplaron las eficiencias de los diferentes sistemas de riego.

Para llevar a cabo la estimación de las necesidades hídricas de la cubierta vegetal, se empleó la metodología coeficiente de cultivo único – evapotranspiración de referencia ( $K_c - ET_o$ ), descrita de forma detallada en el manual de FAO56 (Allen et al., 1998). Esta metodología determina la  $ET_c$  bajo condiciones estándar, por lo que se considera que no existen limitaciones en el desarrollo del cultivo debidas al estrés hídrico entre otras. El método de cálculo establecido en la ecuación 1 (mm/semana), consiste en el producto de dos factores. El primero, la  $ET_o$ , considera la demanda evaporativa y engloba parámetros meteorológicos como la radiación, la velocidad del viento y la sequedad del aire. El segundo, el  $K_c$ , indica el estado de desarrollo de una cubierta vegetal frente a otra considerada de referencia, en FAO56 la festuca. En consecuencia, para realizar la predicción debemos operar cada factor de forma independiente para luego combinarlos en dicha ecuación.

$$1. ET_c = K_c \cdot ET_o$$

### 2.1- Predicción semanal de la $ET_o$ mediante meteorología

La predicción de la  $ET_o$  se basa en la ecuación 2, o ecuación de Hargreaves (Hargreaves and Samani, 1985). Esta ecuación es la recomendada cuando sólo se disponen de datos de temperatura, en lugar de emplear la ecuación de Penman-Monteith que es hasta la fecha la más adecuada y usada diariamente (Allen et al., 1998). Esta ecuación, expresada en mm/día, tiene en cuenta únicamente variables de temperatura media ( $T_{med}$ ), máxima ( $T_{max}$ ), mínima ( $T_{min}$ ) y la radiación extraterrestre ( $R_a$ ). Operativamente, para predecir de forma semanal la  $ET_o$  se emplea la predicción de temperaturas diarias máximas y mínimas con alcance semanal que la Agencia Estatal de Meteorología pone a disposición del público a nivel municipal (AEMeT). Por consiguiente, la suma de las previsiones diarias de  $ET_o$  proporciona la predicción semanal.

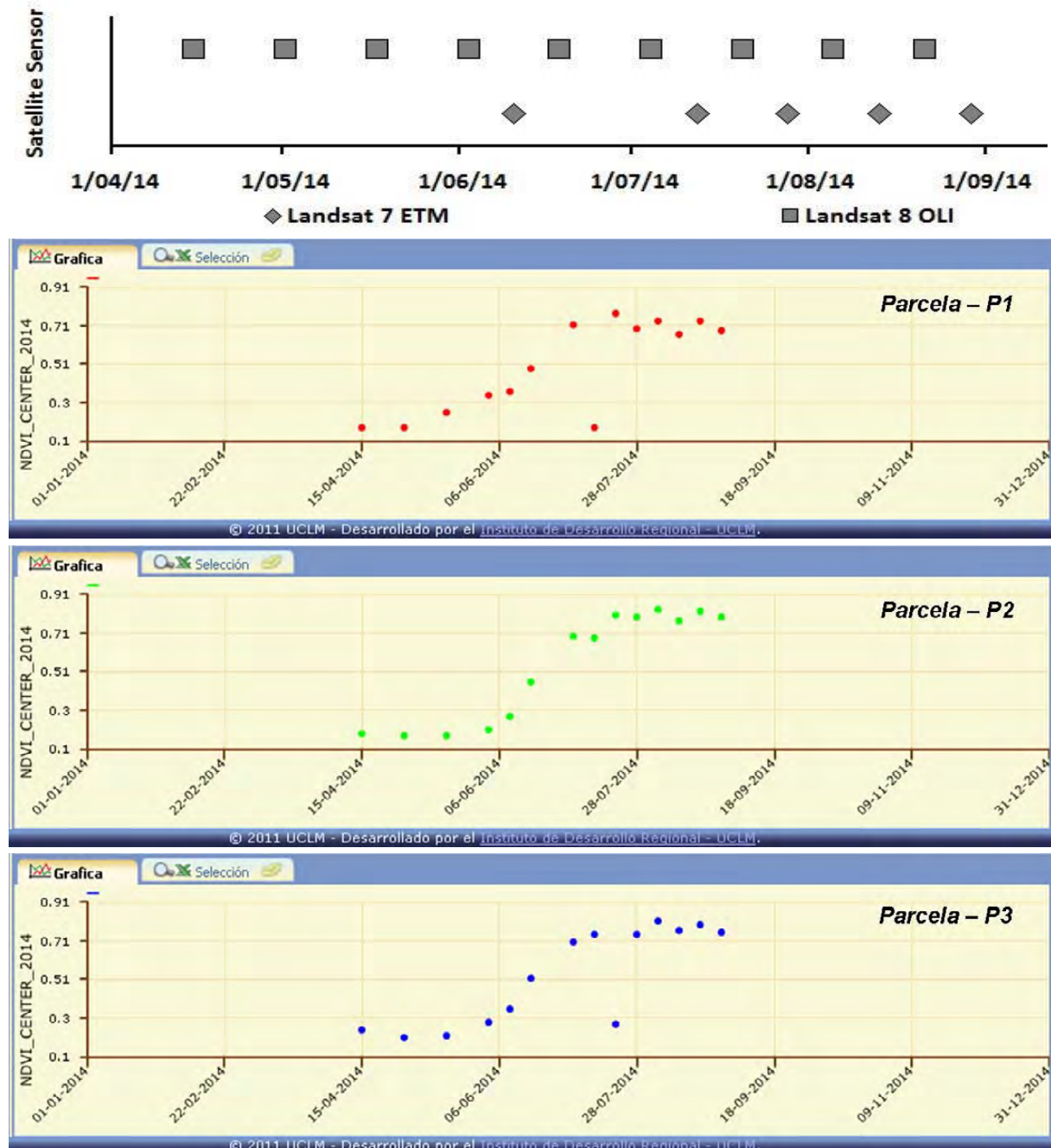
$$2. ET_o = 0,0023 \cdot (T_{media} + 17,8) \cdot (T_{max} - T_{min})^{0,5} \cdot R_a$$

### 2.2- Predicción del $K_c$ mediante teledetección

Durante la experiencia se procesaron 14 imágenes: 9 Landsat 8 OLI y 5 Landsat 7 ETM+ (Figura 2). La presencia de nubes a lo largo de toda la campaña fue notable, y durante septiembre no se pudo disponer de ninguna imagen. La adquisición gratuita y descarga libre fueron posibles gracias al portal “Glovis” adscrito y mantenido por el *United States Geological Service* (USGS, <http://glovis.usgs.gov/>). La escena de trabajo fue la 200-031. Recaltar, que al contar con dos satélites se pudo disponer durante el mes de julio y agosto de una imagen por semana, lo que redujo la problemática de las nubes.

El empleo de imágenes multispectrales capturadas por sensores a bordo de satélites permite obtener índices de vegetación desde los que estimar el  $K_c$  de una cubierta vegetal. El índice de vegetación empleado es el NDVI (Rouse et al., 1973). Es un índice comúnmente empleado en teledetección que mide el tamaño fotosintético relativo de la cubierta. Es un parámetro robusto, simple y sencillo de obtener mediante la combinación algebraica de las reflectividades en el rojo e infrarrojo cercano. Para un uso correcto de los valores de NDVI es necesario proporcionar las reflectividades corregidas en superficie, es decir, hay que corregir atmosféricamente para eliminar el efecto atenuante que tiene la atmósfera sobre la señal recibida. Así, se llevó a cabo una normalización absoluta en cada

imagen de NDVI (Campos et al., 2011). Además, esta corrección atmosférica permite incluir imágenes procedentes de diferentes sensores. Así mismo, el procesado de las imágenes pasó previamente por una corrección radiométrica (Chander et al., 2009). Paralelamente se generó el producto combinación color, junto con el NDVI, para la carga y visualización de las imágenes en el visor WebSIG SPIDER-CENTER Riego. La Figura 2 muestra la evolución temporal del NDVI por parcela (la caída del valor NDVI para la fecha 20 de Julio se corresponde con la presencia de una nube).



**Figura 2.** De arriba abajo: calendario de adquisición y procesado de las imágenes de satélite empleadas Landsat 8 OLI y Landsat 7 ETM+; y evolución temporal del NDVI para las parcelas P1, P2 y P3 respectivamente tal cual se visualizan en el visor WebSIG SPIDER-CENTER Riego (<http://zeus.idr-ab.uclm.es/publico/webgis/>).

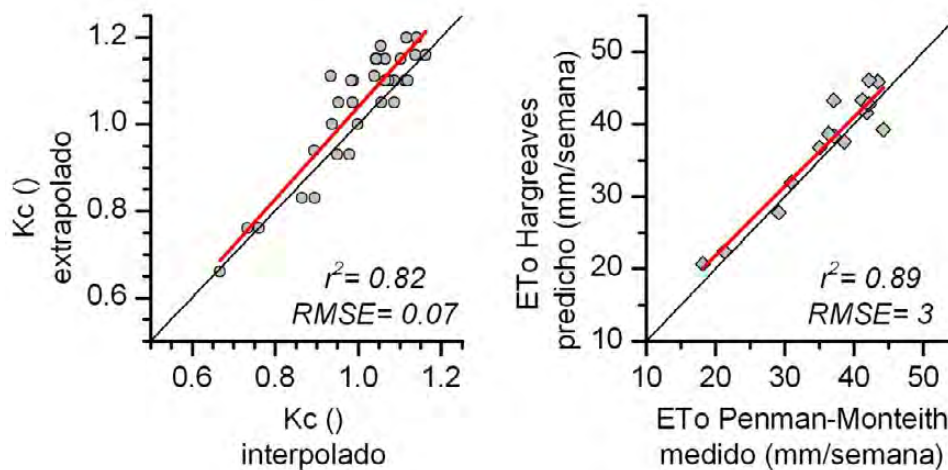


Finalmente, una vez obtenido el NDVI es posible derivar el  $K_c$  mediante una relación lineal ( $NDVI - K_c$ ) mostrada en la ecuación 3 (Cuesta et al., 2005). Dicha ecuación ha sido ampliamente validada en cultivos herbáceos como trigo, cebada, maíz, algodón, girasol, ... que en su fase de maduración alcanzan la cobertura completa y suponiendo un manejo estándar para sistemas de riego como aspersión y pívot. Por consiguiente, la forma de predecir el  $K_c$  es mediante una extrapolación temporal lineal a la fecha central de la semana siguiente de predicción empleando las últimas imágenes disponibles. Por ello, se seleccionaron por parcela un conjunto de píxeles representativos por cada fecha y se obtuvo el promedio del NDVI. A continuación se aplica la ecuación 3, y proporciona un valor extrapolado promedio de  $K_c$  por parcela

$$3. K_c = 1,25 \cdot NDVI + 0,2$$

### 3- Evaluación de los resultados

La evaluación de los resultados se realizó al final de la experiencia. En este apartado la evaluación es dividida desde un punto de vista general, donde se engloba todo el proceso de monitorización, y desde una perspectiva semanal. A nivel global, los resultados mostrados en la Figura 3 se corresponden con la evaluación de la predicción del  $K_c$  y la  $ET_o$  según los siguientes criterios.



**Figura 3.** Comparación: (izquierda)  $K_c$  extrapolado e interpolado obtenido mediante teledetección; (derecha)  $ET_o$  predicho por Hargreaves y medido por Penman-Monteith.

En relación al  $K_c$  extrapolado, su evaluación se realiza según el  $K_c$  interpolado a la misma fecha que el extrapolado. En relación a la  $ET_o$ , los valores predichos son comparados con los valores medidos empleando la metodología de Penman-Monteith. Dichos valores fueron recogidos por la estación agroclimática ubicada en la propia finca experimental del CENTER que pertenece a la red del Sistema de Información Agroclimática para el Regadío, red SIAR (MAGRAMA, 2014). En detalle, ambas comparaciones muestran que a lo largo del periodo de monitorización se extrapolaron valores de  $K_c$  y predijeron valores de  $ET_o$  superiores a los que posteriormente se interpolaron o midieron respectivamente. Si bien, el error medio cuadrático (RMSE) por semana en ambos casos resulta ser bajo, en el caso del  $K_c$  los errores cometidos son ligeros y cualitativamente superiores a los errores producidos por la predicción de la  $ET_o$ .

A nivel semanal, la Tabla 2 y la Figura 4 muestran los resultados que se entregaron al CENTER a lo largo del periodo de monitorización para realizar la programación de riegos.

De forma común a las 3 parcelas de estudio, la  $ET_o$  predicha y medida es la misma. Así, a final del periodo de monitorización la  $ET_o$  predicha superó en 16 mm a la medida. Además, de forma general, los mayores errores se cometieron al comienzo de la experiencia, en la primera y segunda semana.

**Tabla 2.** Resultados por parcela y semana de predicción de las diferentes componentes que se suministraron semanalmente al CENTER para gestionar la programación de riegos.

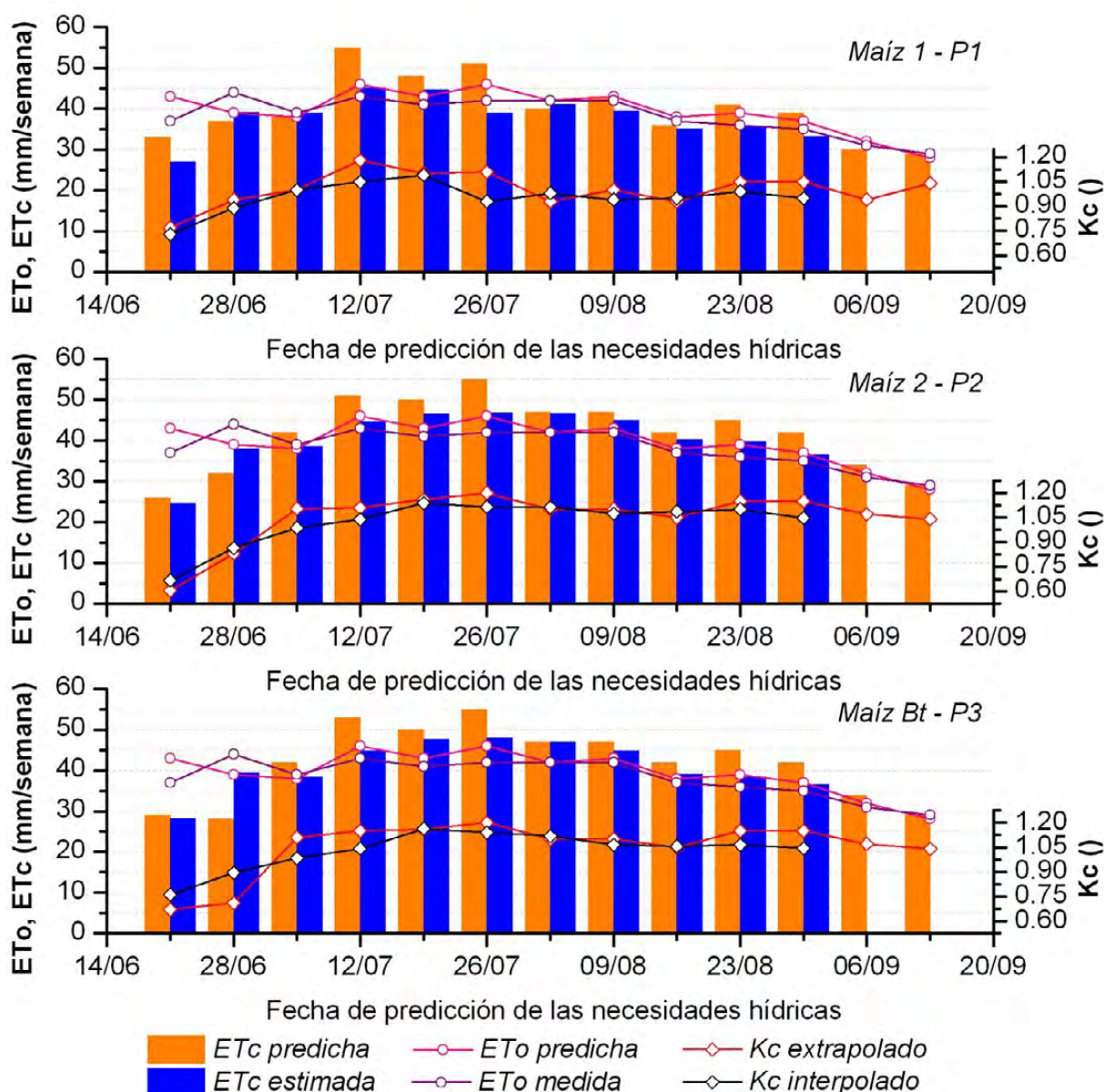
Semana (año 2014)	Valores predichos							Valores estimados						
	$K_c$ ( )			$ET_o$ (mm)	$ET_c$ (mm)			$K_c$ ( )			$ET_o$ (mm)	$ET_c$ (mm)		
	P1	P2	P3		P1	P2	P3	P1	P2	P3		P1	P2	P3
18/06-25/06	0,77	0,60	0,67	43	33	26	29	0,73	0,67	0,76	37	27	25	28
26/06-02/07	0,94	0,83	0,71	39	37	32	28	0,89	0,86	0,89	44	39	38	39
03/07-09/07	1,00	1,11	1,11	38	38	42	42	1,00	0,99	0,98	39	39	39	38
10/07-17/07	1,18	1,11	1,15	46	55	51	53	1,05	1,04	1,04	43	45	45	45
18/07-23/07	1,10	1,16	1,16	43	48	50	50	1,09	1,14	1,16	41	45	47	48
24/07-30/07	1,11	1,20	1,20	46	51	55	55	0,93	1,12	1,14	42	39	47	48
31/07-06/08	0,93	1,10	1,10	42	40	47	47	0,98	1,11	1,12	42	41	47	47
07/08-13/08	1,00	1,10	1,10	43	43	47	47	0,94	1,07	1,07	42	39	45	45
14/08-20/08	0,93	1,05	1,05	38	36	42	42	0,95	1,09	1,06	37	35	40	39
27/08-27/08	1,05	1,15	1,15	39	41	45	45	0,99	1,10	1,07	36	36	40	38
28/08-03/09	1,05	1,15	1,15	37	39	42	42	0,95	1,05	1,04	35	33	37	37
04/09-10/09	0,94	1,07	1,07	32	30	34	34	-	-	-	31	-	-	-
11/09-17/09	1,04	1,04	1,04	28	29	29	29	-	-	-	29	-	-	-
<b>Total</b>	-	-	-	<b>514</b>	<b>461*</b>	<b>479*</b>	<b>480*</b>	-	-	-	<b>498</b>	<b>419</b>	<b>448</b>	<b>452</b>

\* Los valores totales de  $ET_c$  predichas no contienen las dos últimas semanas al no disponer de imágenes para estimar la  $ET_c$ .

Se comentan a continuación los resultados parcela a parcela. En el caso de la parcela P1, las necesidades de riego recomendadas fueron 42 mm superiores al final de la campaña, esto en, un 10% sobre el total estimado de 419 mm. Concretamente, las semanas con mayores errores son la semana 4 y la 6. Dichos máximos semanales en la  $ET_c$  coinciden con las mayores diferencias que se observan en el  $K_c$  (valores superiores de 0,13 y 0,18 en ambas semanas respectivamente). En relación a la parcela P2 la  $ET_c$  predicha al final de la campaña supera en 31 mm a la finalmente estimada, esto es, un 7% frente a los 448 mm finales. De nuevo, la sexta semana presenta una mayor desviación en las recomendaciones de riego aunque en este caso ni el  $K_c$  extrapolado, ni la  $ET_o$  predicha, presentan los mayores errores a lo largo del periodo. Por último, la parcela P3 tuvo nuevamente unas recomendaciones de riego superiores a las estimadas. Sin embargo en esta ocasión, tan sólo alcanzaron los 28 mm a lo largo de toda la campaña, esto es un 6% más del total de 452 mm. Ahora bien, en este caso, el mayor error es cometido por defecto en la semana 2, donde el  $K_c$  se infra estimó al igual que la  $ET_o$ .

De forma general, en la evolución temporal mostrada en la Figura 4, se observan mayores errores durante las primeras 6 semanas de monitorización y predicción, es decir, desde finales de junio y durante todo el mes de julio. Este periodo de tiempo es crítico por

dos factores. El primero de ellos está relacionado con la  $ET_0$ , puesto que el mes de julio es históricamente donde se producen mayores  $ET_0$  diarias, y por lo tanto semanales. Si bien, el análisis mensual de los últimos 10 años en la misma estación SIAR muestra valores diarios promediados de 5,8 y 6,5 mm para los meses de junio y julio, mientras que en agosto, estos valores de  $ET_0$  promediada diaria cae a 5,5 mm. En consecuencia, los errores producidos en este mes tendrán mayor peso sobre el cálculo de las necesidades hídricas. En segundo lugar, el ciclo del cultivo del maíz suele llegar a meseta tras 70 días desde su plantación (Allen et al., 1998). Esto coincide con la primera semana de julio en P3 y con la tercera semana de julio en P1 y P2. Por ello, existe un punto de inflexión en la evolución del  $K_c$  que difícilmente puede ser recogida por una extrapolación temporal lineal. Así, estos dos factores combinados, hacen que el periodo más crítico de predicción sea a durante el mes de julio, tal y como se ha visto anteriormente, pues mayores errores se han cometido.



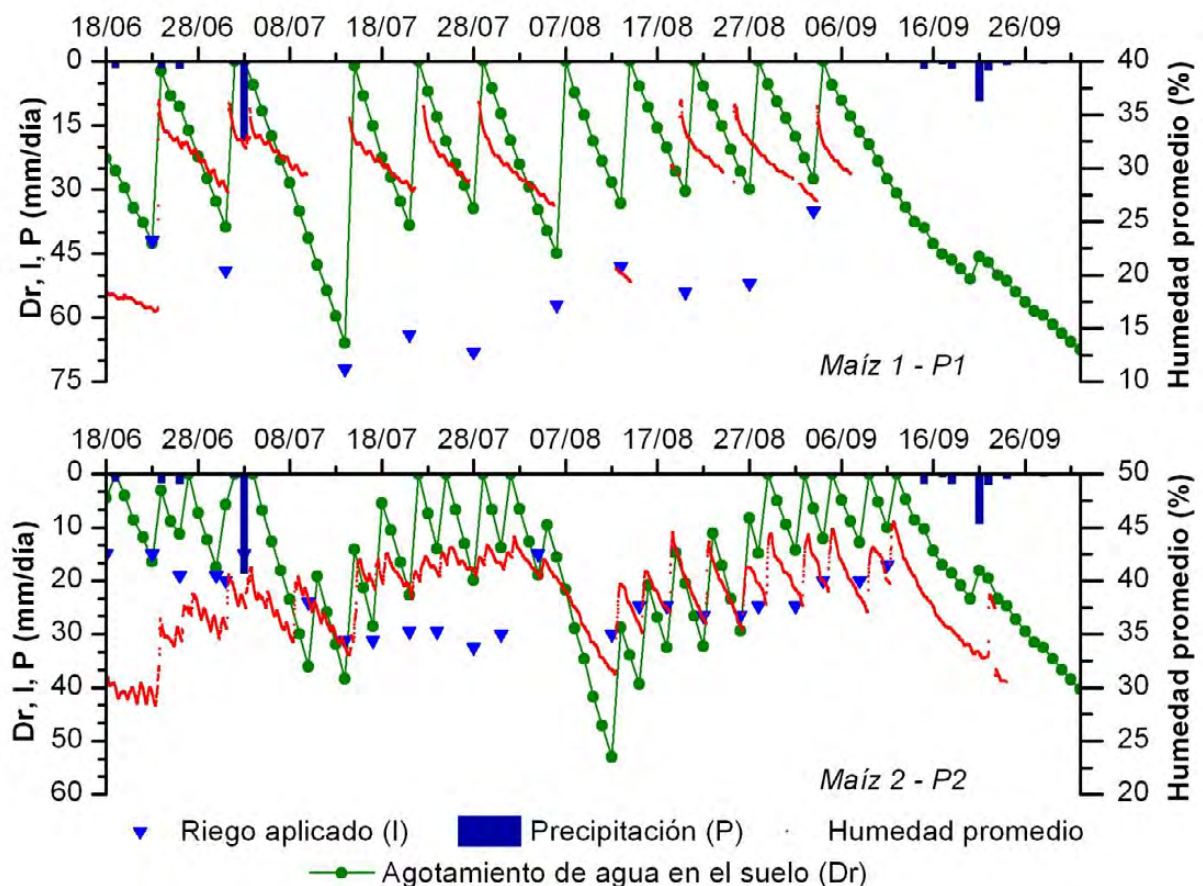
**Figura 4.** Comparación por parcela de estudio de: necesidades hídricas ( $ET_c$ ) predichas y estimadas; evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) predicha y real; y coeficiente de cultivo único ( $K_c$ ) extrapolado e interpolado. Nota: Los valores semanales de  $ET_c$  estimada no contienen las dos últimas semanas al no disponer de imágenes durante septiembre.



### 3.1- Evaluación externa de las dosis de riego recomendadas

La validación externa se realizó mediante sondas de humedad instaladas en las parcelas P1 y P2. Su lectura de la humedad quedó limitada a los primeros 30 cm. En la Figura 5 se puede observar la evolución temporal durante el periodo de monitorización de la humedad promedio en relación con el agotamiento de agua en el suelo, los riegos aplicados y los eventos de precipitación. Estas últimas tres variables se obtuvieron tras la realización de un balance de agua en el suelo asistido por teledetección (Garrido-Rubio et al., 2012; Torres, 2010), una vez obtenida completamente la serie temporal de imágenes NDVI e incorporando el calendario de riegos que finalmente proporcionó el CENTER.

En general se encontró un buen ajuste, especialmente en la parcela P2 donde se archivó un mayor número de registros. Ambas sondas muestran evoluciones de humedad que siguen un comportamiento plano en la mayoría del periodo de monitorización, lo que indicaría una buena adecuación del agua extraída por la cubierta con el agua recibida por el riego. Sin embargo, en la parcela P2, la sonda muestra una ascensión de los valores, al igual que el agotamiento de agua en el suelo, debido a que tras un parón en el riego durante la primera semana de agosto, se trató de recuperar los niveles previos. Esta evaluación ofrece otro punto de apoyo más en la adecuación de la metodología empleada.



**Figura 5.** Evolución del agotamiento de agua en el suelo en la zona de raíces según los riegos aplicados en la parcela P1 (arriba) y P2 (abajo).

### 3.2- Limitaciones a la metodología

Como ya se ha descrito previamente, la experiencia tuvo lugar desde el 18 de junio al 2 de octubre del 2014. Al comienzo de la monitorización, el cultivo de maíz ya había sido sembrado y se situaba aproximadamente en el día 40 de su desarrollo. Consecuentemente, había superado la fase inicial, encontrándose alrededor de la zona central de la fase de desarrollo (valores tabulados de duración de las fases recogidas por el manual FAO56). Con ello, la metodología presentada de coeficiente de cultivo único es apropiada por la alta cobertura del suelo que el cultivo herbáceo presenta, que limita en gran medida la evaporación desde el suelo desnudo tras eventos de riego o precipitación.

Sin embargo, para el establecimiento del cultivo, la relación NDVI –  $K_c$  presentada en la ecuación 3 puede infra estimar el valor del  $K_c$ . Esto es debido a que el cultivo, aún en fase de nascencia, no presenta una cobertura del suelo suficiente por lo que el comportamiento evaporativo del mismo es muy dominante, teniendo en cuenta además que durante dicha fase los riegos suelen ser frecuentes con el fin de garantizar la nascencia e implantación (FAO56). Análogamente, dicha relación podría no ser la más apropiada en cultivos cuya cobertura del suelo no es muy abundante incluso en su fase de meseta. Es el caso de ciertos cultivos hortícolas como cebollas, ajos, etc... donde además, por su escaso desarrollo radicular, requieren de riegos cortos y muy frecuentes para evitar que se agote rápidamente el agua en el suelo explorado por la raíces.

Por consiguiente, cuando la fracción de suelo desnudo es importante sería recomendable seguir la metodología de coeficiente de cultivo dual y estimar de forma independientemente la evaporación del suelo desnudo y la transpiración, lo que permite además diferenciar con el sistema de riego y por lo tanto la superficie efectivamente mojada. La simulación de la evaporación desde el suelo desnudo es uno de los aspectos que más desarrollo ha requerido desde la publicación del manual FAO56 (Allen, 2011; Torres and Calera, 2010). Por tanto, en muchos casos suele ser adecuado determinar la transpiración máxima de la cubierta mediante imágenes y aproximarse de forma específica al análisis de la componente evaporativa del suelo.

### 4- Conclusiones

La monitorización de cultivos mediante series temporales de imágenes de satélite ha permitido la extrapolación del  $K_c$ . Paralelamente, la predicción de las temperaturas por la AEMET abre la posibilidad de predecir la  $ET_o$  mediante la ecuación de Hargreaves. Consecuentemente, la combinación de ambos factores en la metodología  $K_c - ET_o$  ha permitido realizar la predicción semanal de las necesidades hídricas de los cultivos o  $ET_c$ . Por tanto, se han podido programar los riegos a 7 días vista sobre los cultivos de maíz del CENTER según valores de  $K_c$  adaptados a la zona de estudio.

Debido a una ligera sobreestimación de las necesidades hídricas consideramos importante realizar periódicamente una corrección sistemática de las predicciones. Se recomienda obtener el  $K_c$  tras la pasada del satélite, y emplear la  $ET_o$  medida por la red SIAR. La sustitución de ambos parámetros por los empleados en la correspondiente predicción permitirá ajustar las necesidades hídricas del cultivo en la próxima predicción.

La extensión de la metodología podría contribuir a la mejora en la eficiencia del uso de agua en el regadío español, potenciando el papel clave que tiene la red SIAR en la mejora de dicha eficiencia, utilizando para ello secuencias temporales de imágenes de



satélite, la propia red SIAR, y distribuyendo productos y servicios a los usuarios mediante herramientas WebSIG. Pretende también contribuir a responder a las demandas que las políticas europeas establecen en el uso del agua.

## 5- Agradecimientos

El proyecto, financiado por la DGDRPF del MAGRAMA a través del Plan de Actividades del CENTER, se presenta en el marco de las acciones para innovación en los servicios de asesoramiento al regante mediante herramientas basadas en la red SIAR, teledetección y SIG, para un uso más eficiente del agua en el regadío. Queremos agradecer al personal del CENTER la buena disposición de medios y aptitudes para llevar a cabo la experiencia. Agradecer además la política de descarga libre y gratuita de imágenes del satélite Landsat puesta en práctica por el USGS.

## 6- Bibliografía

AEMeT, Predicción por municipios. Agencia Estatal de Meteorología, Madrid.

Allen, R., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Roma, Italy.

Allen, R.G., 2011. Skin layer evaporation to account for small precipitation events—An enhancement to the FAO-56 evaporation model. *Agricultural Water Management* 99, 8-18.

Campos, I., Odi, M., Belmonte, M., Martínez-Beltrán, C., Calera, A., 2011. Obtención de series multitemporales y multisensor de índices de vegetación mediante un procedimiento de normalización absoluta, XIV Congreso de la Asociación Española de Teledetección, Mieres, Asturias, Spain, p. 4.

Cuesta, A., Montoro, A., Jochum, A.M., López, P., Calera, A., 2005. Metodología operativa para la obtención del coeficiente de cultivo desde imágenes de satélite. *ITEA : Información Técnica Económica Agraria* 101, 212-224.

Chander, G., Markham, B.L., Helder, D.L., 2009. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment* 113, 893-903.

Garrido-Rubio, J., Rodríguez, J., Madurga, C., Fraile, L., Calera, A., González, L., Jiménez-Martínez, N., Arellano, I., Campos, I., Odi, M., Moreno-Rivera, J.M., 2012. Integración de la red SiAR e imágenes de satélite en la estimación de las necesidades de agua de riego. Aplicación al Center y su extensión a grandes áreas, XXX Congreso Nacional de Riegos, Albacete, p. 10.

Hargreaves, G.H., Samani, Z.A., 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture* 1 (2), 4.

MAGRAMA, 2014. SiAR, Sistema de información Agroclimática para el Regadío.

Rouse, J.W., Haas, R.H., Deering, D.W., Schell, J.A., 1973. Monitoring the vernal advancement and retrogradation of natural vegetation. *Remote Sensing Center. College Station.*

Torres, E.A., 2010. El modelo FAO-56 asistido por satélite en la estimación de la evapotranspiración en un cultivo bajo estrés hídrico y en suelo desnudo. Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM).

Torres, E.A., Calera, A., 2010. Bare soil evaporation under high evaporation demand: a proposed modification to the FAO-56 model. *Hydrological Sciences Journal* 55, 303-315.



## MANEJO DEL RIEGO Y ABONADO EN EL CULTIVO DE LA PATATA EN LA COSTA NOROESTE DE CÁDIZ

*Salvatierra Bellido, B. (1), Márquez Ruiz, A.J. (1), Luque Sánchez, S.(2), Nieto Martínez, A. (1), Acosta Galán, J.(2).*

<sup>1</sup> Instituto de Investigación y Formación Agraria de la Junta de Andalucía (IFAPA). Centro Chipiona, (Cádiz), [benito.salvatierra@juntadeandalucia.es](mailto:benito.salvatierra@juntadeandalucia.es)

<sup>2</sup> IFAPA. Centro de Jerez, (Cádiz)

### Resumen

Desde el Sistema de Asistencia al Regante del Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera de Andalucía (IFAPA) en el Centro de Chipiona (Cádiz), se está desarrollando una labor de experimentación de cultivos hortícolas al aire libre. En esta línea se están ensayando cultivos para evaluar la eficiencia del riego y abonado nitrogenado. El objetivo final de estos ensayos es generar unas recomendaciones de riego y fertirrigación útiles para el sector. El cultivo de la patata es un cultivo muy extendido en la zona de Costa Noroeste de Andalucía, por su precocidad en la comarca. El objetivo general del ensayo es determinar de todos los posibles manejos de riego y abonado, cual es la opción más eficiente y más productiva. Para ello se ha utilizado tres dosis de riego, una sobre las necesidades potenciales de agua, otra por encima y otra por debajo, la primera de ellas con manejo dos métodos de riego: aspersión y goteo. Además cada una de estas estrategias con dos dosis distintas de abonado. Y todo ello replicado en dos parcelas de distintos suelos. El resultado general de todo el abanico de posibilidades ha sido que está muy influenciado del tipo de suelo. Para un suelo más equilibrado el abonado determina mucho más los buenos resultados y con dosis de riego más justas el del abonado es muy determinante. Sin embargo en parcelas de suelo arenoso la dosis de riego en el rendimiento es determinante, pero la variable abonado influye en menor medida en el rendimiento y menos cuando la dosis de riego es más alta, induciéndose a regar con riegos con una mayor frecuencia a la diaria.

### 1- Introducción y objetivos

El Centro IFAPA de Chipiona está ubicado en la desembocadura del río Guadalquivir, dónde los cultivos herbáceos al aire libre de regadío son muy variados y dónde desde ahí y hacia el norte (Bajo Guadalquivir) es dónde se aglutina la mayor parte de cultivo herbáceo de regadío de Andalucía. En este centro de Investigación coinciden dos proyectos de experimentación y transferencia del IFAPA relacionados con estos cultivos: el proyecto de Asesoramiento al Regante y el proyecto de cultivos herbáceos al aire libre. El IFAPA tiene entre sus cometidos ejecutar acciones desarrollo experimental que configuren decisiones en la utilización correcta de los fertilizantes, con esta perspectiva se ha trabajado en la asociación entre el manejo de riego y el abonado sobre un cultivo en concreto: la patata. El cultivo de la patata es un cultivo muy extendido en la zona de Costa Noroeste por la precocidad que ofrece el clima en esta zona. En el mercado nacional los precios son muy oscilantes y requieren de una mayor profesionalización del sector. El objetivo ha sido determinar cuál es el mejor manejo para optimizar los recursos agua y abonado. Ambos factores hoy en día también son determinantes para la rentabilidad del cultivo. Igualmente es



necesario estudiar su interacción para afinar en el manejo de agua condicionado por otro recurso que cada vez es más caro y más controlado, el nitrógeno en el suelo.

Además del objetivo general de determinar la opción más eficiente y más productiva utilizando las variables de dosis de abonado y dosis de riego sobre el cultivo de la patata, se integran los siguientes objetivos específicos:

- Ajuste del coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) para nuestra zona y por tanto la recomendación del riego.
- Ajuste de recomendación de abonado para maximizar producción y la calidad del producto.
- Comparación entre el sistema de riego localizado y por aspersión en el cultivo de la patata.
- Interacción entre el manejo del riego y el abonado en este cultivo.

El propósito final de estos ensayos es generar unas recomendaciones de riego y fertirrigación útiles para el sector.

## 2- Materiales y métodos

Para los objetivos propuestos se han utilizado dos parcelas experimentales muy representativas de los dos tipos de suelos utilizados para el cultivo de la patata en la zona. Se denominará a las parcelas utilizadas: Parcela 1 o de Jerez de la Frontera y Parcela 2 o de Chipiona. Para el diseño hemos contamos con riego localizado en ambas parcelas y en la Parcela 2 además de riego localizado se cuenta con riego por aspersión. El sistema de riego por aspersión es el que mayoritariamente utilizan los agricultores de la comarca de Costa Noroeste.

La localización exacta de ambas se expone en la siguiente tabla:

**Tabla 1.** Datos de localización la Parcela 1

Localizaciones de las parcelas	Parcela 1	Parcela 2
Provincia	11 (Cádiz)	11 (Cádiz)
Municipio	20 (Jerez de la Frontera)	16 (Chipiona)
Polígono	106	14
Parcela	18	76
Superficie	2050 m <sup>2</sup>	1774 m <sup>2</sup>



**Figura 1.** Imágenes del desarrollo de los ensayos de las dos parcela. La 1 a la izquierda y la 2 a la derecha.

Las diferencias físicas de ambas parcelas son las siguientes-

#### **Características del suelo:**

- Parcela 1: Presenta una textura franco arcillosa. Con una conductividad eléctrica de 1,4 mS/cm en el extracto saturado, quedando muy por debajo del límite para considerarlo salino en 4 mS/cm y un nivel bajo de sodio, situado en 0,44 meq/100 gr.
- Parcela 2 presenta una textura arenosa (90% arena), con un nivel de materia orgánica de 1,09%, el cual podemos considerar como un nivel medio-bajo. La conductividad eléctrica nos indica la salinidad del suelo, 3,15 mS/cm en el extracto saturado lo cual hace que el suelo sea ligeramente salino, quedando el límite para considerarlo salino en 4 mS/cm, y es un factor a tenido en cuenta en el ensayo.

#### **Características del agua:**

- Parcela 1: El agua utilizada este ensayo proviene de un pozo con una conductividad eléctrica en de 1,98 dS/m
- Parcela 2: Esta agua es proporcionada por la comunidad de regantes. Tiene valores oscilantes de conductividad eléctrica, pero con un valor máximo al final del cultivo de de 3.09 mS/cm a 25 °C, con lo que se ha hecho un manejo de riego con las correspondientes necesidades de lavado de cada momento y los resultados esperados tendrán un nivel menor de producción.

#### **Material vegetal:**

Para el ensayo se utilizo la variedad “*Spunta*” en ambas parcelas. Esta esta variedad está clasificada como semitemprana debido a que su ciclo de cultivo tiene una duración de unos 120 días aproximadamente.

#### **Material de riego:**

En ambas parcelas el sistema de riego por goteo es similar, en la parcela 2 además tiene un tratamiento más de riego por aspersión incluido en el diseño experimental y dispone de las siguiente características

- **Goteros:** 4 l/h; Marco 0,33 x 0,8 metros.
  - **Laterales:** diámetro de 16 mm., 4 atm.
  - **Portalaterales:** diámetro de 40mm., 6 atm.
- **Aspersión:**
  - **Aspersores:** 1092 l/h, boquilla 5/32 + 3/32, marco 12x12m., todos sectoriales de 180°, pluviometría de 15,1 l/m<sup>2</sup> hora.

#### **Diseño experimental:**

En ambas parcelas se planteó un experimento sobre el efecto de las variables de riego y de fertilización nitrogenada en el cultivo de la patata. Se ensayaron tres niveles de riego y dos niveles de abonado variando sólo el nivel de nitrógeno como se detallan en las tablas siguientes.



**Tabla 1.** Tratamientos de riego

R1	R2	R3	R4
Riego localizado 80% de la dosis potencial	Riego localizado 100% de la dosis potencial	Riego localizado 120% de la dosis potencial	Riego por aspersión 100% de la dosis potencial

**Tabla 2.** Tratamientos de abonando

Unidades de fertilizantes	Dosis de abonado 1. (A1)	Dosis de abonado 2. (A2)
Nitrógeno	189	261
Fósforo	150	150
Potasio	300	300

De cada abonado de fertirrigación se fijaron los siguientes planificaciones de dosis (Oltra et al., 2006):

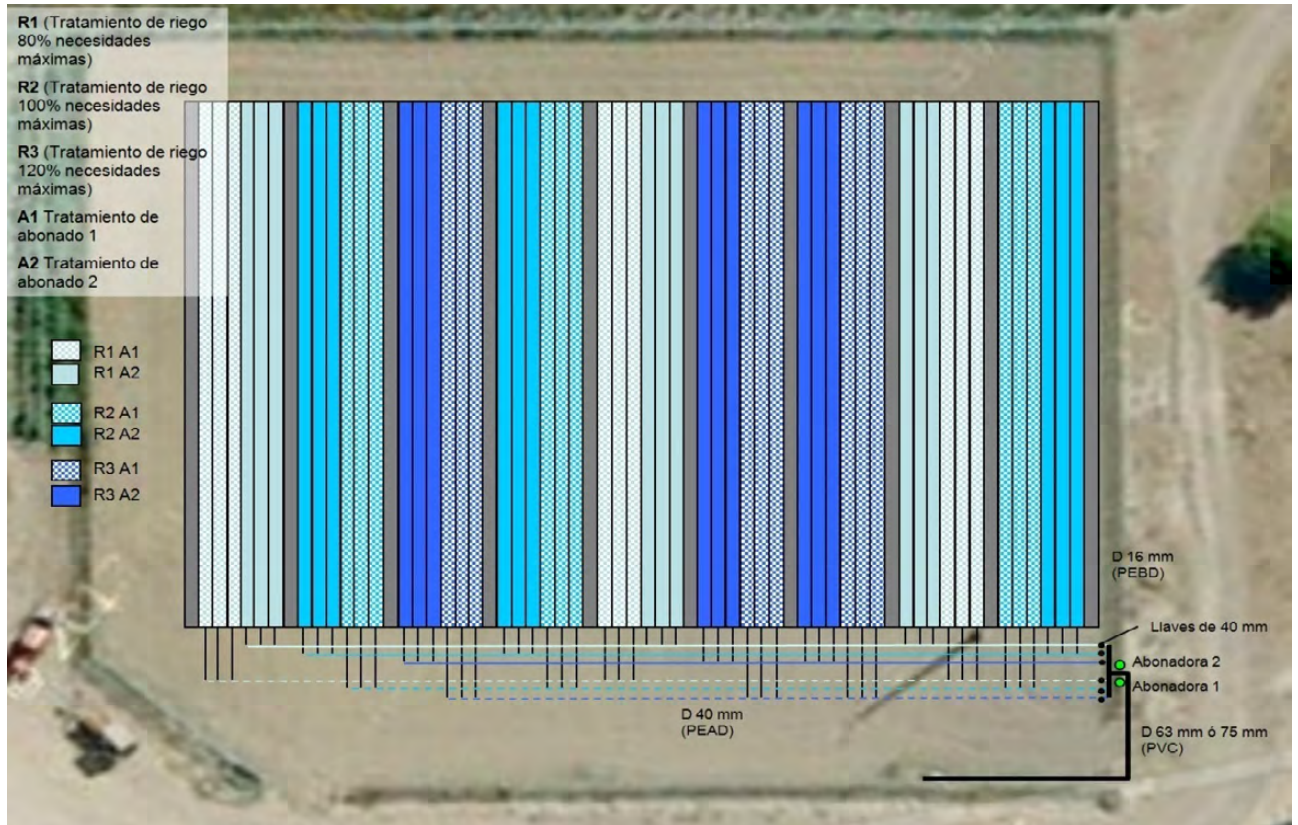
**Tabla 3.** Distribución del abonado 1

ABONADO 1 (A1)		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
<b>TOTAL</b>		<b>188</b>	<b>140</b>	<b>301</b>
FONDO		60,5	100,0	153,3
	Semana	Kg/ha	Kg/ha	Kg/ha
Emergencia	1-5	22,5	30,0	0,0
Estolonización	6-7	7,6	10,0	0,0
Comienzo de la tubérculo	8-10	63,6	0,0	63,9
Relleno del tubérculo	11-13	33,9	0,0	63,9
	14-16	0	0,0	20,1

**Tabla 4.** Distribución del abonado 2

ABONADO 2 (A2)		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
<b>TOTAL</b>		<b>260</b>	<b>140</b>	<b>301</b>
FONDO		83,5	100,0	153,3
	Semana	Kg/ha	Kg/ha	Kg/ha
Emergencia	1-5	31,5	30,0	0,0
Estolonización	6-7	10,4	10,0	0,0
Comienzo de la tubérculo	8-10	87,6	0,0	63,9
Relleno del tubérculo	11-13	47,1	0,0	63,9
	14-16	0,0	0,0	20,1

La unidad experimental fueron parcelas con tres líneas de cultivo en un diseño de bloques completos al azar. El experimento fue un diseño de tipo factorial con las variables dosis de riego y dosis de abonado. e incluye tres repeticiones, ( seis combinaciones posibles en cada bloque) como se puede observar en la figura 2. En el diseño de los ensayos se incluye entre cada tratamiento de riego una línea borde sin cultivar.



**Figura 2.** Esquema estándar del diseño experimental del riego localizado de las dos parcelas.

En la parcela 1 existe un cuarto tratamiento, para ensayar una dosis del 100% a través de riego por aspersión de los dos tratamientos de abonado (A1, A2) pero mediante la aplicación de dos coberturas de abono sólido convencional. El objetivo de este cuarto tratamiento es hacer constar el manejo tradicional de riego y abonado de la comarca para comparar las ventajas de eficiencia de riego y abonado y de producción del riego localizado con fertirrigación frente a el manejo tradicional. Se ha realizado en la parcela 1 por contar con un suelo de textura arenosa, donde existe un mayor riesgo de lavado de Nitrógeno y pérdidas de agua por percolación. En este caso se resaltarían, dentro del mismo ensayo, las diferencias productivas entre ambos manejos con mayor claridad.

#### **Metodología de evaluación del ensayo:**

Los valores a medir en estos ensayos fueron el rendimiento del cultivo y su calibre. Se recolectó la línea central de cada repetición, cada una fue pesada y calibrada según los siguientes rangos de calibre: menor de 40 mm de diámetro, entre 40 y 60 mm, entre 60 y 80 mm y mayor de 80 mm.

#### **Análisis estadístico:**

Con los distintos datos de producción recogidos, a diferentes niveles de abonado de riego, se ha realizado el análisis de varianzas. Se realizó un análisis de varianza de diseño factorial teniendo usando las variables riego y abonado con una disposición en bloque (en nuestro caso tenemos tres bloques de repetición en cada ensayo).

### 3- Resultados y discusión

Los principales datos obtenidos son los resultados de producción, de calidad de la patata y de seguimiento del riego de cada estrategia de riego. A continuación se detallan cada bloque de datos.

Los datos de producción de cada repetición de los tratamientos. Cada repetición viene designada por el número del tratamiento de riego "R" y el número del tratamiento de abonado "A"

**Tabla 5.** Datos de producción (Kg/ha) pertenecientes a la parcela 1

Bloque	Tratamientos	Kg/ha
1	R2A1	50.854
1	R2A2	48.811
1	R1A2	48.933
1	R1A1	52.713
1	R3A2	46.616
1	R3A1	54.878
2	R3A2	46.250
2	R3A1	52.043
2	R1A1	52.409
2	R1A2	41.585
2	R2A2	40.915
2	R2A1	50.793
3	R3A2	41.951
3	R3A1	47.012
3	R2A2	35.884
3	R2A1	48.659
3	R1A1	51.646
3	R1A2	46.463

De los datos anteriores nos interesan los calibres comprendidos entre 40 y 80 mm por ser los más comercializables. Estos calibres representan un porcentaje de la producción total (tabla 6 y 8) y puede ser uno de los valores que se ven afectados tanto por el riego como por el abonado.

**Tabla 6.** Porcentajes de calibre comerciales cosechados en la parcela 1.

Porcentajes de patata con calibres entre 40 y 80 mm de la parcela 1						
BLOQUE	PARCELAS EXPERIMENTALES					
1	R2A1	R2A2	R1A2	R1A1	R3A2	R3A1
	59,66	84,55	66,14	76,45	78,47	67,30
2	R3A2	R3A1	R1A1	R1A2	R2A2	R2A1
	85,66	84,82	75,79	90,00	89,75	78,82
3	R3A2	R3A1	R2A2	R2A1	R1A1	R1A2
	89,22	95,62	87,64	91,44	78,03	86,79

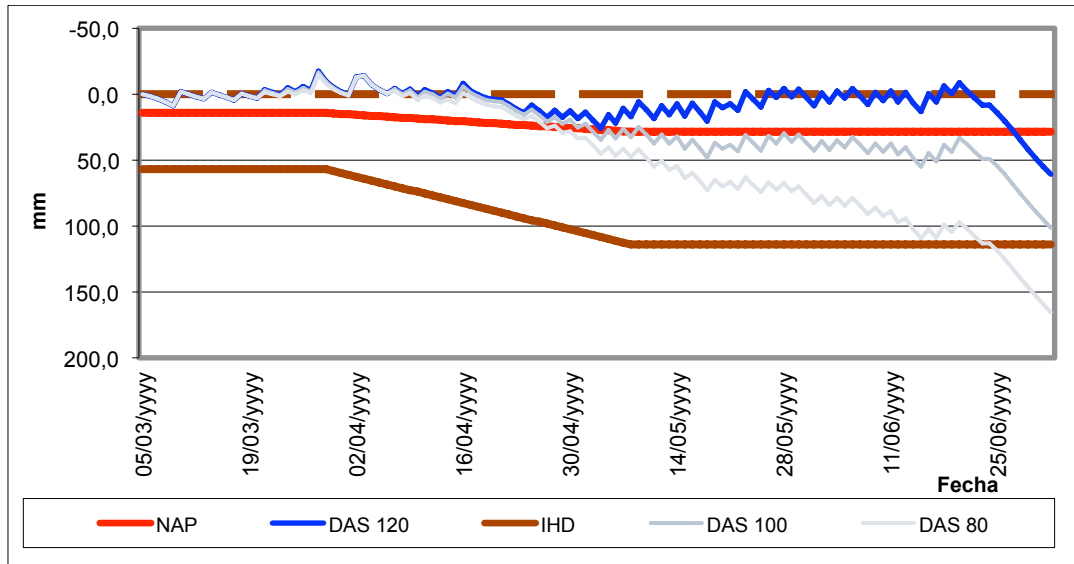
**Tabla 7.** Datos de producción (Kg/ha) pertenecientes a la parcela 1

Parcela	Bloque	Tratamientos	Kg/ha
1	1	R1A2	26923,1
2	1	R1A1	27243,6
3	1	R2A2	30288,5
4	1	R2A1	24519,2
5	1	R3A2	31250,0
6	1	R3A1	29647,4
7	2	R2A2	27604,2
8	2	R2A1	19791,7
9	2	R3A2	35590,3
10	2	R3A1	37152,8
11	2	R1A2	27256,9
12	2	R1A1	22916,7
13	3	R1A2	24905,3
14	3	R1A1	19412,9
15	3	R3A2	28409,1
16	3	R3A1	29545,5
17	3	R2A2	25947,0
18	3	R2A1	20075,8

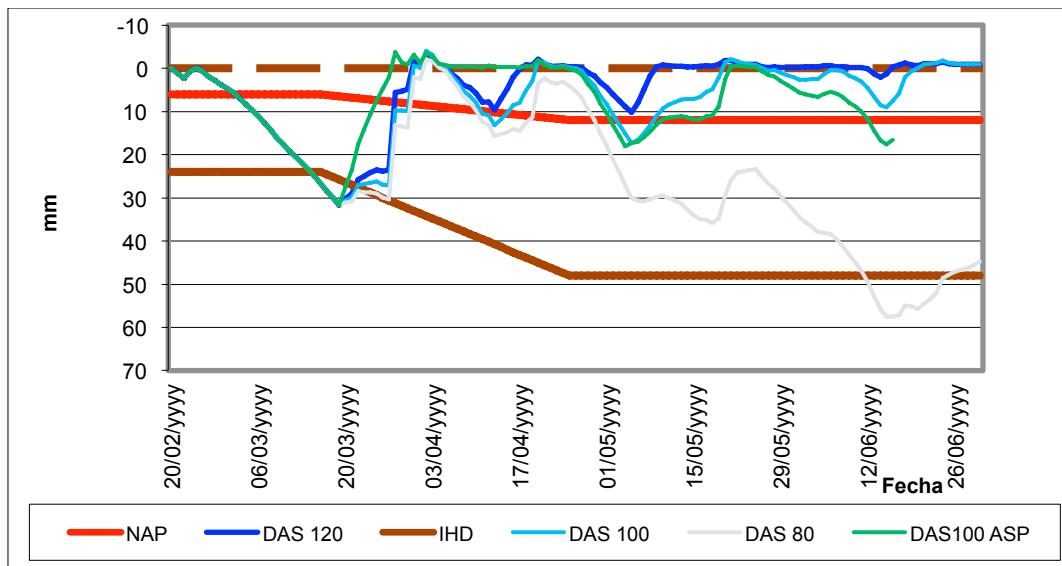
**Tabla 8.** Porcentajes de calibre comerciales cosechados en la parcela 2.

Porcentajes de patata con calibres entre 40 y 80 mm de la parcela 2						
BLOQUE	PARCELAS EXPERIMENTALES					
1	R1A2	R1A1	R2A2	R2A1	R3A2	R3A1
	88,99	97,37	95,54	96,29	97,12	97,52
2	R2A2	R2A1	R3A2	R3A1	R1A2	R1A1
	91,72	92,64	97,77	98,89	95,37	95,18
3	R1A2	R1A1	R3A2	R3A1	R2A2	R2A1
	93,63	94,92	94,67	83,33	95,11	94,83

El manejo del riego fue programado semanalmente en función del método de balance de agua en el suelo (Allen et al., 1998), utilizando sendas estaciones agroclimáticas de la Red de Información Agroclimática de Andalucía. Se aplicaron dosis medias semanales en función a la dosis indicada para cada estrategia de riego. El resultado de la evolución del Déficit de Agua en el Suelo (DAS) para cada parcela y durante la campaña de cada estrategia, se representa en las figuras 4 y 5. En estas también se fija los valores de Nivel de Agotamiento Permisible para el cultivo de la patata según Allen et al., 1998. El punto de marchitez permanente del cultivo se representa como valor inferior de Intervalo de Humedad Disponible (IHD).



**Figura 4** Gráfico de la evolución de los Déficit de Agua en el Suelo (DAS) para los distintos tratamientos de riego de la parcela 1.



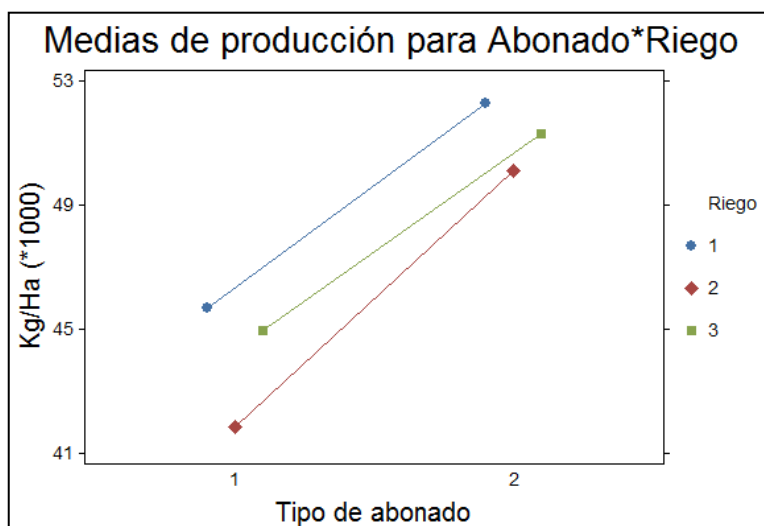
**Figura 5** Gráfico de la evolución de los Déficit de Agua en el Suelo (DAS) para los distintos tratamientos de riego de la parcela 2.

Como resumen de ambas parcelas en el habito de riego, cabe destacar la regularidad de los episodios de riego en la parcela 1 frente a la parcela 2, pudiendo éste además de la salinidad el factor que baje el nivel productivo de la parcela 2 frente a la 1.

En la parcela de aspersión se refleja un peor ajuste a la parcela testigo (dosis del 100% de goteo) pero situada entre la dosis superior e inferior. Con los datos expuestos se realiza un análisis de varianza de diseño factorial, usando las variables riego y abonado y con disposición en bloque. Este análisis se realiza tanto para rendimiento como para calibre de calidad. El fin de este análisis es comprobar de forma fehaciente la influencia de las distintas variables en la productividad.

Para una probabilidad de 0.05, se observa una clara influencia de la variable abonado en el rendimiento, en cambio la variable riego en nuestro caso tiene una influencia mucho menor (no significativa). La combinación de abono y riego arroja un valor mucho mayor y por tanto se deduce que su influencia es no significativa.

A continuación en las figuras 6 y 7 se representan los valores de producción en relación con el abonado y dosis de riego.

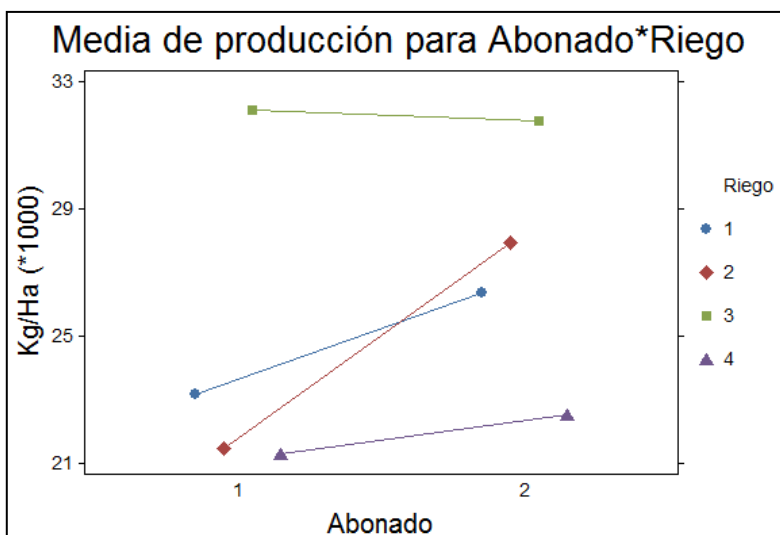


**Figura 6** Gráfico de medias de producción para la parcela 1 diferenciadas para las dos estrategias de abonada y diferenciadas por las dosis de riego (1, 120%; 2, 100% y 3, 80%).

En el gráfico de medias anterior se ve claramente la total influencia del abonado en la producción, mientras el riego es poco o nada determinante (las líneas tienen una disposición casi paralela)

En la parcela 2 existe una clara influencia de la variable “riego” en el rendimiento, además con suficiente significación. En menor medida, la variable abonado influye en el rendimiento.

También se observa que la combinación de riego y abonado no aporta la suficiente significación para ser tenida en cuenta, por tanto abonado y riego serán tenidos en cuenta de forma separada.





**Figura 7** Gráfico de medias de producción para la parcela 2.

En la figura anterior se ve claramente la influencia del abonado en la producción, mientras el riego donde existe una total diferencia es en el tipo 3 (120% de las necesidades)

#### 4- Conclusiones y recomendaciones

Los datos obtenidos ratifican las ventajas del sistema de riego localizado y la fertirrigación para este cultivo, con las siguientes consideraciones:

Para la parcela 1 con el suelo **franco arcilloso** se observa lo siguiente:

- Una clara influencia de la variable abonado sobre el rendimiento, en relación a la significación de la variable dosis riego.
- El aumento del abonado nitrogenado influye de forma determinante en el aumento de producción en las tres dosis de riego, siendo la dosis del 100% de las necesidades, la que mejor responde a este aumento de nitrógeno.
- En la dosis de riego del 80 % de las necesidades existe una media de producción más alta pero no significativa para ambos niveles de abonado. Por tanto podemos ir a una dosis ligeramente más baja en la programación de riego.

Para la parcela 2 con el suelo **arenoso**, se ha obtenido las siguientes conclusiones:

- Una influencia determinante de la dosis de riego en el rendimiento, además con suficiente significación, pero en menor medida, la variable abonado influye en el rendimiento y menos cuando la dosis de riego es más alta.
- Queda claramente diferenciado que el riego de 120% produce un mayor rendimiento y esto puede ser explicado por diversas razones:
  - Por el tipo de suelo (90% de arena), con poca de retención. Por tanto al ser un riego localizado, el mayor tiempo de riego implica un mayor volumen de humectación y un mayor tiempo de riego. No teniendo en este caso excesiva influencia el abonado por realizarse siempre al final del riego.
  - La calidad del agua, esta tiene una conductividad eléctrica de 3,09 mS/cm, valor bastante elevado que aun habiendo hecho el precedente lavado, provoca una ligera barrera en la absorción de agua y nutrientes.
- El tratamiento de riego por aspersion con el 100% de la dosis, obtiene el menor rendimiento medio, esto se debe a la menor uniformidad en la aplicación de riego y al método de aplicación del abono (aplicación de fondo y dos coberteras). . Otra causa es el estrés que provoca del agua de riego en la parte aérea de la planta, produciéndose una daño foliar y fitotoxicidad.
- Para un riego del 100% en riego localizado, existe una mayor respuesta al abonado que en el resto de los riegos.

Las producciones más altas de la parcela 1 con respecto a la parcela 2 demuestran que es necesario regar la parcela 2 con más de un ciclo de riego diario, tanto por el suelo, como por el posible efecto de la salinidad.

#### 5- Bibliografía

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes and D., Smith, M. (1998). "Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements". FAO Irrigation and Drainage Paper No 56, Rome.

Alonso Arce, Fernando. El cultivo de la patata. Madrid: Mundi-Prensa, 2002.



XXXIII Congreso Nacional de Riegos  
Universitat Politècnica de València, Valencia 2015  
DOI:<http://dx.doi.org/10.4995/CNRiegos.2015.1506>

Oltra Cámara, Marco Antonio, et al. "Óptima fertilización para un alto rendimiento de patata (*Solanum tuberosum* L.)". En: *Nutrición mineral : aspectos fisiológicos, agronómicos y ambientales* / Carmen Lamsfus Arrien (editora-coordinadora) ; Pedro M. Aparicio Tejo...[et al.] (editores). Pamplona : Universidad Pública de Navarra, 2006. Vol. 2. ISBN 84-9769-164-4, pp. 375-381



# OPTIMIZACION DE LA FERTIRRIGACION DE LA FRESA EN LA PROVINCIA DE HUELVA. EFICIENCIA EN EL USO DEL ABONADO

*Molina, F.*<sup>1</sup>, *Gavilán, P.*<sup>2</sup>, *Ruiz, N.*<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Director Departamento Agronómico. Gat Fertiliquidos, Niebla (Huelva).  
pacomolina@gatfertiliquidos.com

<sup>2</sup> Investigador Titular. IFAPA Centro Alameda del Obispo, Apdo. 3092, 14080 Córdoba,  
pedrod.gavilan@juntadeandalucia.es

<sup>3</sup> Técnica Especialista Contratada. IFAPA Centro Alameda del Obispo. Apdo. 3092, 14080 Córdoba, natividad.ruiz.baena@juntadeandalucia.es

## 1- Introducción y Objetivos

En el cultivo protegido de la fresa está muy extendido el control de los parámetros climáticos y de humedad del suelo (Gavilán y col., 2014). Sin embargo, los sistemas para el control de la nutrición han tenido menor grado de desarrollo. El cultivo tiene un periodo crítico que influye en una menor asimilación de nutrientes que coincide con temperaturas bajas del suelo, inferiores a 12° C, de noviembre a febrero, volumen reducido de raíces al comienzo de la plantación, pocas horas luz, menor actividad fotosintética, plantas forzadas para crecer rápidamente, elevada humedad relativa y baja transpiración.

Además, la fresa, en gran parte de la provincia de Huelva, se cultiva en suelos arenosos, con escaso poder de retención de agua y nutrientes, y con agua de riego que tampoco aporta nutrientes. Se riega con alta frecuencia y, en cierto modo, se puede considerar como un cultivo hidropónico en suelo. Por todo ello, la tendencia en la zona es abonar por concentración de nutrientes equilibrados en el agua de riego.

Los pocos trabajos sobre fertirrigación en fresa en Huelva se han realizado en los comienzos del cultivo y con variedades antiguas (Cadahia, et al. 1988). En cuanto a los estudios sobre las relaciones que existen entre absorción mineral y consumo de agua concluyen que son complejas y reflejan la dificultad para disponer de una estimación fiable de manejo de ambos para aplicarlo posteriormente al manejo de la fertirrigación, debida a la imposibilidad práctica de controlar los parámetros que afectan a un agrosistema en campo. En la práctica, sugieren que ambos procesos no están influenciados con igual intensidad por las condiciones medioambientales. Para niveles de consumo de agua bajos (inferiores a 12 l planta<sup>-1</sup> mes<sup>-1</sup>) existe una clara relación lineal entre la absorción de agua y de nutrientes (Duchein et al., 1994). Sin embargo esta relación no se mantiene para valores elevados de consumo de agua, indicando que la absorción mineral está más negativamente afectada por otros factores como la temperatura del suelo que por la absorción de agua.

En colaboración con el IFAPA, que realiza estudios sobre las necesidades de riego del cultivo, Gat Fertiliquidos, empresa fabricante de fertilizantes líquidos, estudia su fertilización, para poder ayudar a los agricultores a fertirrigar de forma más eficiente.

Al comenzar los ensayos sobre riego se planteaba la duda de, si al bajar el volumen de agua de riego al cultivo manteniendo las concentraciones de fertilizantes que actualmente aplican, al recibir éste menos agua y menos fertilizante, se produciría un déficit de fertilizante, lo que obligaría a aumentar la concentración del mismo en el agua de riego.

Los objetivos de este trabajo fueron: 1) Determinar si cantidades de riego y abono menores a las normalmente usadas afectan a su absorción. 2) Relacionar la eficiencia del abonado con la eficiencia del agua de riego.

## 2- Materiales y Métodos

Los trabajos se realizaron en una parcela comercial del T.M. de Almonte, en la Comarca agrícola Condado-Litoral, cerca de la aldea “El Rocío”, en un suelo arenoso, sobre un cultivo de fresa (*Fragaria x ananassa*) de la variedad *Antilla* durante la campaña 2013/14. El suelo de la finca del ensayo se califican como arenosos (clasificación USDA), con un 90% de arena. La empresa propietaria de la finca realizó todas las labores de cultivo propias de la fresa en los ensayos.

Se realizó un ensayo con cuatro tratamientos. Los tres primeros tratamientos (T1, T2, y T3) recibieron volúmenes similares de riego, con el objetivo de cubrir las necesidades de agua del cultivo. La diferencia entre ellos estuvo en el caudal de la cinta de riego usada, cintas de 2.5, 3.8, y 5 l h<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup> para T1, T2, y T3, respectivamente. T4 recibió diferente volumen de riego respecto a los anteriores, basados en el volumen real utilizado en la finca, para comparar nutrición mineral de la planta con riego menor a lo utilizado en la finca por los agricultores de la zona. Todos los tratamientos se regaron con la misma concentración de nutrientes (CE) en agua, pero con diferentes volúmenes de riego. Más detalles sobre el experimento pueden encontrarse en Gavilán y col. (2014)..

Se realizó un seguimiento analítico mensual desde noviembre hasta mayo en cada tratamiento, en el que se analizaron CE, pH, bicarbonatos y macronutrientes, expresados en mS/cm y mmol/l. Para determinar el contenido de fertilizante aportado se analizó la solución fertilizante real (SFR) que aportaba el sistema de riego. Se midieron los siguientes perfiles en suelo en cada tratamiento: Para determinar lo que la planta tenía a su disposición se analizó la solución del suelo (SS) a 15 cm de profundidad usando sondas de succión. Y para determinar lo que la planta no había tomado se analizó la solución de drenaje o lixiviado (SD) obtenidas de lisímetros de drenaje.

Para la recogida de la solución de entrada o gotero se instaló en cada tratamiento una cinta en paralelo para no afectar al cultivo. Para la recogida de la solución de suelo se instalaron sondas de succión en cada tratamiento, con capsula cerámica francesa de 63 mm diámetro, a 15 cm de profundidad, y ambas a 10 cm de la cinta de riego. Para la recogida de la solución de drenaje se utilizaron los lisímetros de drenaje instalados en cada tratamiento (Gavilán y col., 2014). Por último, para la recogida de muestra vegetal se tomaron hojas adultas más jóvenes, completamente desarrolladas, con peciolo, en un número de 100 representativas de cada tratamiento.

Con estos datos analíticos se analizaron los cuatro tratamientos, determinando el fertilizante aportado y lo que la planta no ha tomado, expresados en mS cm<sup>-1</sup> y mmol l<sup>-1</sup>, usando las relaciones SS/SFR y SD/SFR de cada ion. Se estimó la acumulación de Cl<sup>-</sup> y de Na<sup>+</sup>, y la reconcentración de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> respecto al Cl<sup>-</sup> y K/Na. Para relacionar la eficiencia en el uso del abonado con la eficiencia del agua de riego se convirtieron los nutrientes analizados de mmol/l a Unidades Fertilizantes mgr l<sup>-1</sup>, y se comparó entrada respecto a salida de nutrientes y su aprovechamiento por la planta (% de cada volumen de solución). Por último, se recogieron muestras vegetales tomando hojas adultas representativas de cada tratamiento. Se analizaron todos los macro (Nitrógeno %, Fósforo %, Potasio %, Calcio %, Magnesio %) y microelementos (Hierro ppm, Zinc ppm, Manganeso ppm, Cobre ppm, Boro ppm, Sodio ppm). Se analizó si existían diferencias de concentración de nutrientes en hojas entre tratamientos, la evolución y curvas de estos durante el ciclo del cultivo.

## 3- Resultados

### 3.1 Evolución de los fertilizantes aplicados en cada tratamiento (SFR)

El promedio de salinidad (CE) de las muestras analizadas durante la campaña, en la SFR o entrada al cultivo, fue de 0,4 mS/cm, comenzando con valores mínimos de 0,25 y llegando hasta 0,7 mS/cm al final del cultivo. (Figura 1).

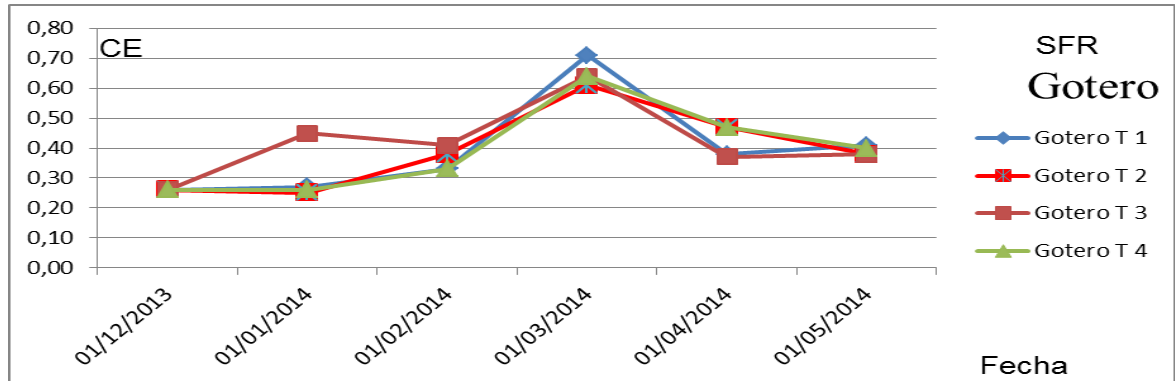


Figura 1. Evolución de los valores de CE de la SFR de entrada al cultivo en campaña.

### 3.2 Comparación de las relaciones solución de nutrientes de Salida/Entrada al cultivo en cada tratamientos (SS/SFR, SD/SFR)

Para comparar la solución nutritiva que entraba al sistema suelo-planta con la que quedaba en el suelo y con lo que le sobraba en el drenaje, en cada tratamiento se analizaron las relaciones SD/SFR, SS/SFR, y se compararon los valores promedios de los análisis de toda la campaña.

En la solución de suelo (SS) los promedios de CE de las muestras, de la relación SS/SFR, fueron de 3,52 mS/cm (T1), 1,51 (T2), 2,52 (T3), y 4,71 mS/cm (T4), con una desviación típica media de 1,37. (Tabla 1). Presentó menor concentración de nutrientes en la solución del suelo (SS) el tratamiento que recibió menor volumen de agua de riego y con caudal de cinta intermedio T2 ( $3.8 \text{ l h}^{-1} \text{ m}^{-1}$ ), y presentó mayor concentración de nutrientes y mayor valor de esta relación de CE el tratamiento con mayor volumen de riego T4, concretamente en  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Ca}^{++}$ , y  $\text{Mg}^{++}$ .

SS/SFR	CE	$\text{NO}_3^-$	$\text{PO}_4\text{H}_2^-$	$\text{SO}_4^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{++}$	$\text{Mg}^{++}$
Sondas T1	3,52	2,43	1,49	5,00	5,69	1,17	1,62	15,43	5,98
Sondas T2	1,51	2,21	0,60	1,54	1,90	1,34	1,39	3,12	4,59
Sondas T3	2,52	2,24	0,55	8,95	1,54	1,12	0,74	3,48	4,93
Sondas T4	4,71	3,62	0,94	1,73	11,53	1,00	1,43	30,34	21,45
Desviación	1,37	0,67	0,44	3,48	4,64	0,14	0,38	12,84	8,16

Tabla 1. Comparación de valores promedios de las relaciones SS/SFR. (CE mS/cm, iones  $\text{mmol l}^{-1}$ )

En drenaje en la relación SD/SFR el promedio fue de 1,19 (T1), 1,16 (T2), 0,93 (T3), y 1,14 (T4), con diferencias muy pequeñas entre tratamientos, con una desviación típica media de 0,12. (Tabla 2). Presentaron menor valor en esta relación de CE y mayor aprovechamiento de nutrientes el tratamiento con menor volumen de agua y caudal de cinta de riego de  $5 \text{ l h}^{-1} \text{ m}^{-1}$ , el T3. Presentó mayor valor de esta relación y mayor pérdida por drenaje el resto de tratamientos, con valores similares el T1 (1,19), T2 (1,16), y T4 (1,14). El tratamiento con mayor volumen de agua T4 presento mayor drenaje en  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4\text{H}_2^-$  y  $\text{K}^+$ .

SD/SFR	CE	$\text{NO}_3^-$	$\text{PO}_4\text{H}_2^-$	$\text{SO}_4^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{++}$	$\text{Mg}^{++}$
Lisímetro T1	1,19	2,26	0,98	2,28	1,07	1,18	1,10	6,60	1,96
Lisímetro T2	1,16	2,68	0,52	1,79	1,02	1,20	0,83	5,27	1,65
Lisímetro T3	0,93	2,31	0,24	2,17	0,89	1,10	1,07	4,76	1,11
Lisímetro T4	1,14	3,45	2,20	2,26	1,06	1,08	1,85	5,43	1,63
Desviación	0,12	0,55	0,87	0,23	0,08	0,06	0,44	0,78	0,35

Tabla 2. Comparación de valores promedios de las relaciones SD/SFR. (CE mS/cm, iones mmol l<sup>-1</sup>)

Los valores del % de CE del drenaje  $((CE_{SD} - CE_{SFR}) / CE_{SFR}) * 100$  fueron similares entre los distintos tratamientos, siguiendo las mismas curvas durante toda la campaña, sufriendo en marzo una bajada en su evolución también en todos los tratamientos. (Figura 2). El nivel máximo de todos los tratamientos fue de 44%. A pesar de la aplicación de distintos volúmenes de riego concurren para esta coincidencia entre distintos tratamientos la baja CE de la solución nutritiva de entrada al cultivo SFR.

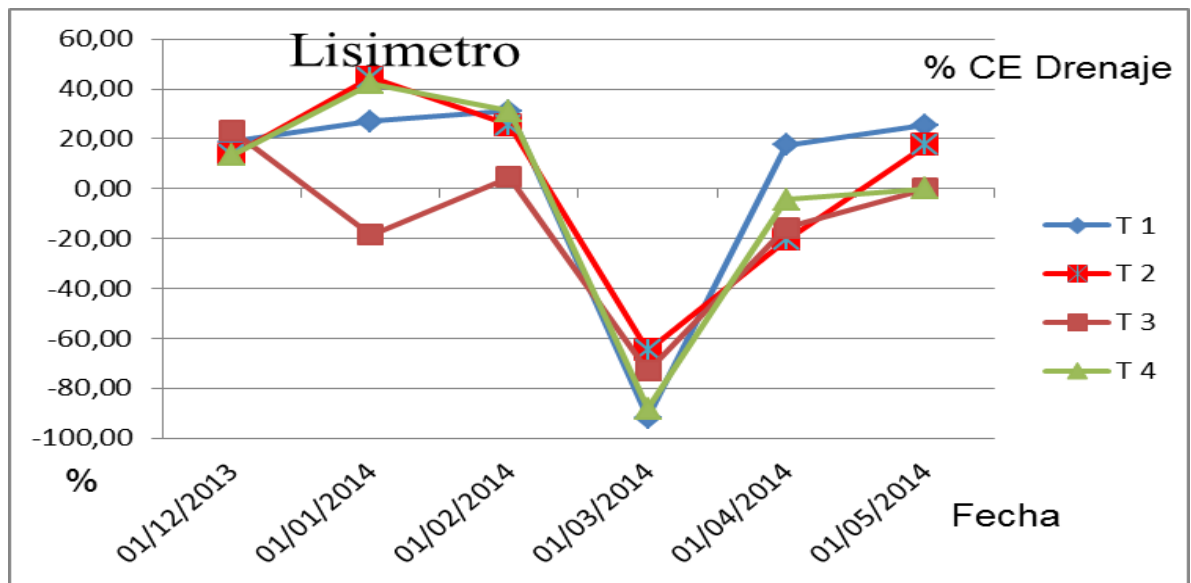


Figura 2. Los valores de % CE de drenaje durante la campaña

### 3.3 Comparación de la acumulación de cloro y de sodio

Como indicador de que las dotaciones de agua fueron suficientes para evitar la acumulación salina, de cloro y sodio, en el medio, se aplicaron las siguientes fórmulas para el cálculo del % de cloro que entraba al sistema respecto al que tenía en la SS y al que salía por drenaje:

$$\text{Para el cloro: } [1 - (\text{Cl de la SFR} / \text{Cl de la SD})] \times 100$$

$$\text{Para el sodio: } [1 - (\text{Na de la SFR} / \text{Na de la SD})] \times 100$$

Para estos cálculos se debe tener en cuenta que la CE de la SFR de entrada al cultivo es baja (aproximadamente  $CE = 0,5 \text{ mS cm}^{-1}$ ) y los niveles de Cl y Na también lo son ( $2,5\text{-}2 \text{ mmol l}^{-1}$ ).

Los promedios de reconcentración de Cl y Na dieron valores bajos durante toda la campaña en todos los tratamientos. En drenaje los valores de cloro se situaron en 5% (T1), 2% (T2), 1% (T3), y 5% (T4) (Figura 3). En drenaje los valores de sodio se situaron en 12% (T1), 15% (T2), 9% (T3), y 6% (T4) (Figura 3). No superando valores de 30% ni en Cl ni en Na. No se produjeron acumulación de Cl<sup>-</sup> ni de Na<sup>+</sup> en ningún tratamiento.



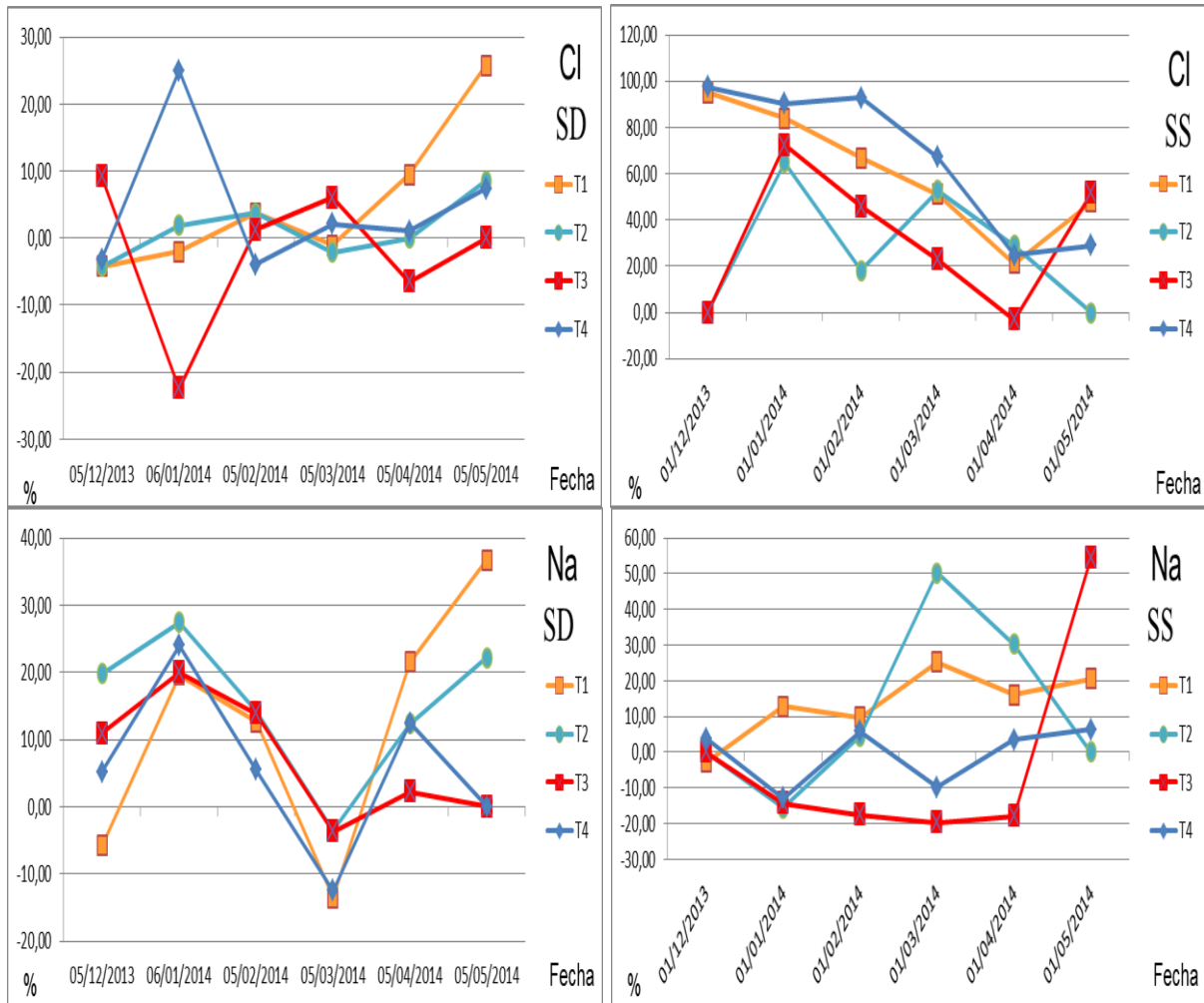


Figura 3. Acumulación de Ca y Na en *suelo SS* y en *drenaje SD*

### 3.4 Comparación de la eficiencia del abono/eficiencia riego

Para relacionar la eficiencia en el uso del abonado con la eficiencia del agua de riego: se convirtieron los  $\text{mmol l}^{-1}$  analizados a Unidades Fertilizantes en  $\text{mgr l}^{-1}$ , y se expresó en %, por cada 100 litros de agua de riego que entraba cuantas unidades fertilizantes aportaban, y su correspondiente volumen de drenaje cuantas aportaba y su relación. Se comparó entrada respecto a salida de nutrientes y su aprovechamiento por la planta. (Figura 4).

Los promedios de la relación eficiencia abono/eficiencia riego de todos los macronutrientes mostraron valores mayores de eficiencia en el tratamiento con mayor eficiencia de riego y menor volumen de drenaje el T3 (88%), seguidos de T2 (76%), y T1 (75%). El valor menor de esta relación lo presentó el tratamiento con menor eficiencia de agua y mayor porcentaje de drenaje el T4 (63%). En este tratamiento este mayor volumen de drenaje no fue compensado con una menor CE de drenaje o consumo por la planta respecto a los otros tratamientos, por este motivo quedó más desfavorable en esta relación.

Estos valores fueron menores en la media de los 4 tratamientos en los nutrientes con movimientos en el suelo por flujo de masa, nitrógeno (42%) y calcio (72%), y fueron mayores en los nutrientes que se mueven en el suelo por difusión, fósforo (97%) y potasio (88%).

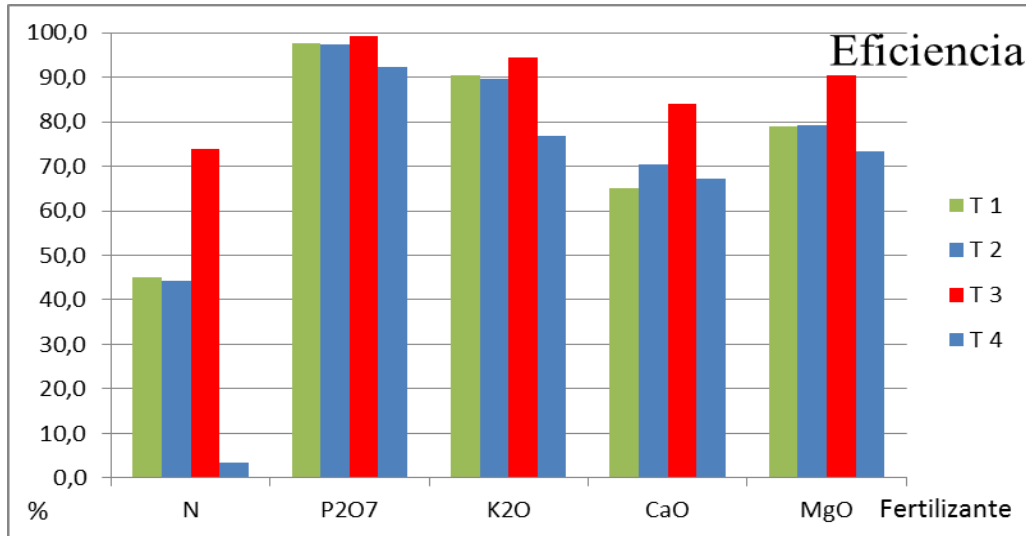
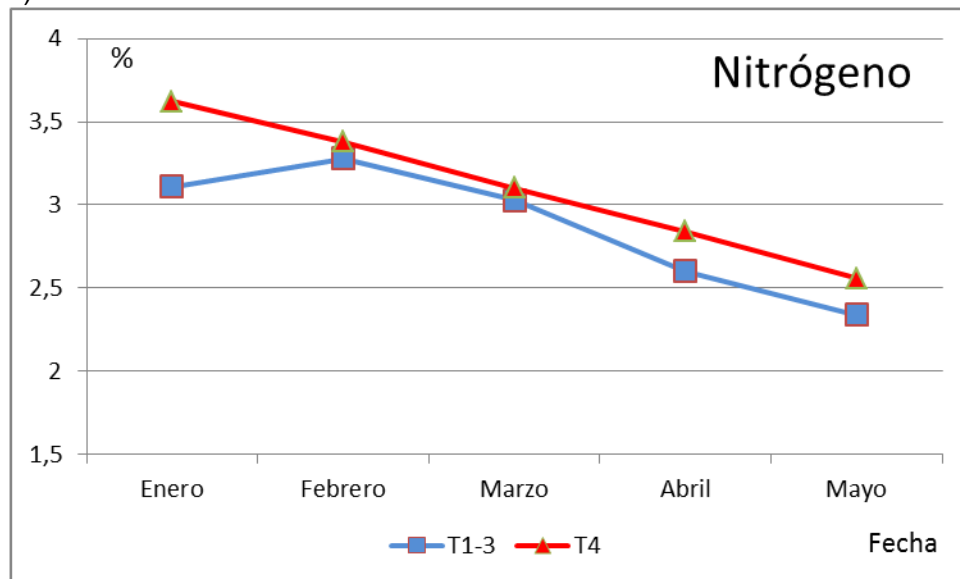
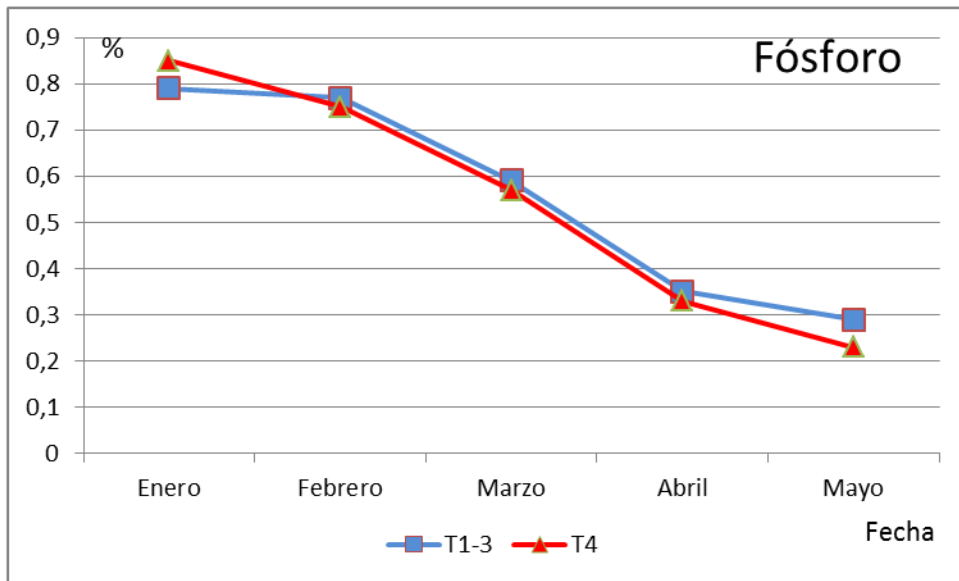


Figura 4. Relación eficiencia abono/eficiencia riego de los macronutrientes para los cuatro tratamientos.

### 3.5 Comparación de los análisis foliares

En cuanto a los análisis foliares, presentaron niveles más altos en hoja el T4 respecto al resto, en N (diferencia 0,23%) y K<sup>+</sup> (0,16%), no existieron diferencias de valor en P y Mg y más bajos en Ca y Microelementos. Se obtuvieron los siguientes resultados (Figura 5).





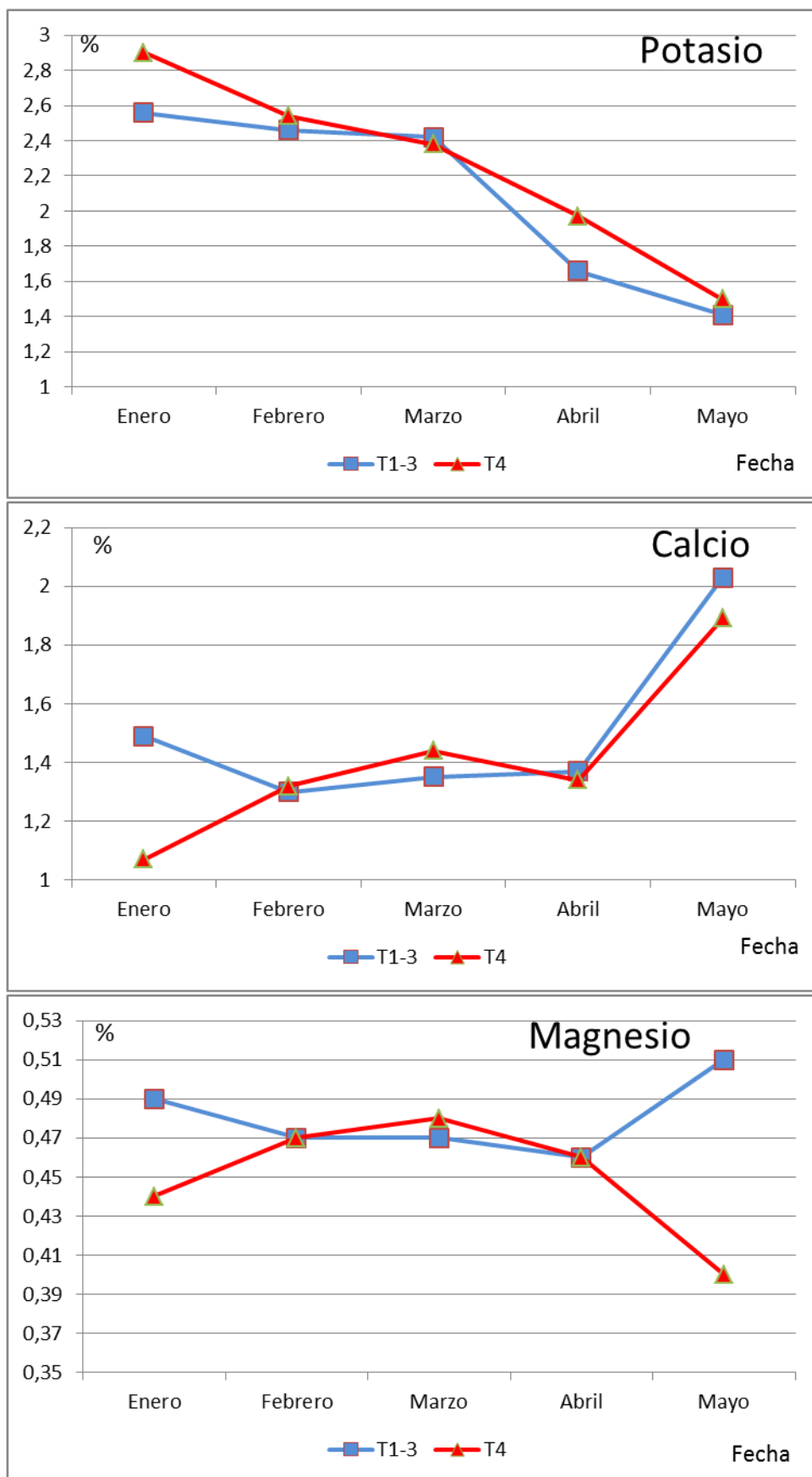


Figura 5. Niveles de macronutrientes en análisis de hoja en *Sabrina*.



#### 4- Conclusiones y Recomendaciones

Con la concentración de entrada de nutrientes al cultivo aplicado y los volúmenes de agua de riego aplicados, no se observaron grandes diferencias ni en la solución del suelo ni en la de drenaje, en los distintos tratamientos, con volúmenes de agua de riego distintos. No se produjeron acumulaciones de sales en zonas radicales en tratamientos con distintos volúmenes de riego. Las pequeñas diferencias aparecieron en favor de los menores volúmenes de agua aplicados, sobre todo y por este orden T3 y T2. Menores volúmenes de agua aplicados presentaron mayores eficiencias y aprovechamiento en el uso de los fertilizantes. Sin embargo, en los análisis de hoja aparecieron niveles más altos sobre todo de N y K en el tratamiento con más agua y fertilizante T4.

La producción no presentó diferencias entre tratamientos, 516 gr/plantas (T1), 544 (T2), 556 (T3), y 560 (T4).

La concentración de sales en SS y SD fue muy parecida a la del gotero, no existiendo interacción ni retención en el suelo. Se concluye que es indispensable un aporte continuo de nutrientes equilibrados para cada etapa del desarrollo de la planta, suministrados al ritmo que los pueda absorber la planta, para evitar pérdidas.

Recomendamos un siguiente estudio para conocer la concentración de sales a aplicar en cada momento del riego, teniendo en cuenta que con los riegos de precisión es más limitada la fertilización que con el riego tradicional.

#### Agradecimientos

Este trabajo no habría podido ser realizado sin el patrocinio de las empresas SUREXPORT SL, y GAT FERTILIZADOS.

#### 5- Referencias

Duchain, M.C., Baile, M., Balle, A., (1994). "Water use efficiency and nutrient consumption of greenhouse rose grown in rockwool". *Acta Horticulturae*.

Gavilán, P., Lozano, D., Ruiz, N., Molina, F., 2014. El riego de la fresa en el entorno de Doñana. Evapotranspiración, coeficientes de cultivo y eficiencia del riego. XXXII Congreso Nacional de Riegos. Asociación Española de Riegos y Drenajes. Madrid, 10-12 junio de 2014.

Cadahía, C. (1988). Fertilización en riego por goteo de cultivos hortícolas, Edit. ERT Fertilizantes, Unión Explosivos Rio Tinto, Madrid.

## **GRUPOS TEMAS “B”**

# **SALINIDAD, DRENAJE, EFECTOS AMBIENTALES Y AGUA DE RIEGO**

---

Adecuación de las características del suelo al método de riego. Efecto del clima y de su posible cambio en las prácticas e infraestructuras de riego. Impacto del regadío y drenaje en el entorno natural. Las prácticas de riego y sus efectos sobre la mejora de la capacidad de reserva de agua en el suelo. Lixiviación de sales y otros elementos. Recuperación de suelos salinos. Calidad del agua de riego (sales, contaminantes). Escasez de agua de buena calidad. Aprovechamiento de aguas subterráneas para riego. Utilización para el riego de aguas depuradas, regeneradas o desalinizadas. Efecto de estas aguas sobre el suelo, cultivos y acuíferos. Riesgos de la utilización de aguas residuales regeneradas en los seres vivos.





## PROBLEMÁTICA DE LA APLICACIÓN DE AGUA MARINA DESALINIZADA AL RIEGO AGRÍCOLA. CASO DE ESTUDIO DEL CANAL DEL CAMPO DE CARTAGENA

*Martínez-Alvarez, V.<sup>1</sup>, Martín-Gorriz, B.<sup>1</sup>, Soto-García, M.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Universidad Politécnica de Cartagena, Paseo Alfonso XIII, 48. 30203 Cartagena. E-mail: victoriano.martinez@upct.es y b.martin@upct.es.

<sup>2</sup> Comunidad de Regantes del Campo de Cartagena, Paseo Alfonso XIII, 22, 30201 Cartagena. E-mail: mariano.soto@crcc.es

### Resumen

En este trabajo se presenta una revisión de las principales cuestiones agronómicas y de manejo que se deben considerar cuando se plantea la incorporación de agua marina desalinizada en el riego agrícola. Este análisis se fundamenta en una revisión bibliográfica a escala internacional de las primeras experiencias que se están dando a conocer mediante publicaciones en el ámbito científico.

Los principales aspectos a considerar en el riego con agua marina desalinizada son: (1) carencias y desequilibrios nutricionales en la composición química, que pueden limitar el desarrollo de los cultivos; (2) elevada concentración de boro, que puede producir problemas de fitotoxicidad en cultivos sensibles; (3) elevada acidez y poder corrosivo como consecuencia de la escasa mineralización del agua, que puede afectar a las instalaciones de riego; y (4) necesidad de una mayor capacidad de control y gestión del agua en las explotaciones agrícolas.

Además, se analiza la problemática en un caso de estudio concreto, que se corresponde con la incorporación de agua marina desalinizada al embalse de La Pedrera, analizándose la mitigación de sus posibles inconvenientes mediante la mezcla en distintas proporciones con el agua continental suministrada habitualmente a dicho embalse mediante las infraestructuras del postrasvase Tajo-Segura.

### 1- Introducción y objetivos

La incorporación de agua marina desalinizada (AMD) a zonas regables del sureste español es la principal estrategia recogida en la planificación hídrica española con el fin de hacer frente al déficit estructural de agua, que persiste en esta zona desde hace varias décadas.

La revisión a escala global de las principales experiencias de riego agrícola con agua desalinizada pone de manifiesto que en numerosos países con clima árido o semiárido, y que además disponen de una agricultura altamente tecnificada, la desalinización de aguas salobres representa una fuente de agua suplementaria desde hace varias décadas. Sin embargo, a pesar de que hay países donde se está considerando la posibilidad de aplicar AMD al riego agrícola en un futuro próximo, tras la revisión de las bases de datos internacionales más relevantes sólo se han encontrado referencias de su utilización en España e Israel. En España las referencias existentes son: (1) las Islas Canarias, donde hay una prolongada experiencia cuyas conclusiones no son extrapolables al sureste español

dada su gran singularidad agroambiental y en el manejo de los cultivos, y (2) recientes suministros desde plantas desalinizadoras del sureste, que generalmente se han mezclado de forma minoritaria con otros recursos continentales y han carecido de seguimiento científico. La experiencia israelí, que se ha desarrollado durante la última década, se caracteriza por un adecuado seguimiento científico y por su semejanza agronómica con el sureste español, motivo por el que sus resultados y conclusiones representan una fuerte de información fundamental para abordar con éxito la incorporación de AMD al riego agrícola.

La principal ventaja del AMD es su condición de recurso hídrico inagotable y no sujeto a variaciones climáticas, por lo que estratégicamente resulta idóneo para aumentar de forma sistemática la disponibilidad de recursos hídricos para riego agrícola en zonas deficitarias como el sureste español. Como principal inconveniente persiste el elevado consumo energético asociado a su producción, que cuadruplica el del trasvase Tajo-Segura, generando un coste del agua producto muy elevado y un nivel de emisiones de gases de efecto invernadero poco compatible con las políticas demandadas para el control del cambio climático. El coste total de producción en las desalinizadoras de agua marina de la cuenca del Segura oscila entre 0,60 y 0,69 € m<sup>-3</sup>, mientras que el valor marginal neto del agua de riego en las zonas regables de la costa se sitúa entre 0,51 y 1,05 € m<sup>-3</sup>. Estos datos ponen de manifiesto que, con los costes actuales, no se puede generalizar la idea de suplir la actual carencia de recursos hídricos para riego del sureste español con AMD. Solamente los cultivos más tecnificados y con mayores márgenes económicos pueden soportar los costes del AMD, pero a costa de una notable pérdida de rentabilidad en comparación con la situación actual. En este sentido también se manifestaron los expertos convocados por la FAO en 2004, donde se concluyó que la aplicación de técnicas de desalinización al riego agrícola es, en general, poco efectiva económicamente, limitándose su utilización a casos concretos de cultivos con alto valor añadido y subvenciones gubernamentales (FAO, 2006).

La osmosis inversa se ha generalizado como la tecnología de referencia para la desalinización de agua marina, ya que presenta consumos energéticos y costes de producción reducidos en comparación con el resto de tecnologías aplicables a gran escala. El agua resultante de esta técnica (agua marina osmotizada) se caracteriza por su escasa mineralización e importantes desequilibrios en su composición, por lo que no es apta para ningún tipo de suministro (doméstico, agrario o industrial). Para adecuar las características del agua marina osmotizada a los requerimientos de los distintos usos debe someterse a postratamientos de remineralización en la propia planta desalinizadora, o mezclarse con otras aguas que corrijan sus desequilibrios. Los postratamientos aplicados actualmente se han diseñado con el fin de adecuar las características del agua resultante (agua marina desalinizada, AMD) a los requerimientos de calidad para consumo humano, recogidos en el RD 140/2003. Sin embargo, estos requerimientos no son los más adecuados para la agricultura, por lo que el uso de AMD conforme a los criterios de calidad del RD 140/2003 en el riego agrícola puede derivar en problemas agronómicos que afecten tanto a la productividad de los cultivos como a la calidad de las cosechas.

Estos problemas agronómicos ya se han puesto de manifiesto en Israel (Yermiyahu *et al.*, 2007; Ben-Gal *et al.*, 2009), donde las primeras experiencias de sustitución de agua de origen continental por AMD proveniente de las plantas de Ashkelon y Palmachim no están siendo plenamente satisfactorias. En estas experiencias se han detectado problemas agronómicos que afectan a la productividad de los cultivos, a los costes de fertirrigación y a la conservación de los suelos agrícolas, aspectos que pueden comprometer su viabilidad económica en el corto plazo y su sostenibilidad ambiental en el medio-largo plazo.

En este trabajo se presenta una revisión de las principales cuestiones agronómicas y de manejo que se deben considerar cuando se plantea la incorporación de AMD en el riego agrícola. Este análisis se fundamenta en una revisión bibliográfica a escala internacional de

las primeras experiencias que se están dando a conocer mediante publicaciones en el ámbito científico. Además, se analiza la problemática en un caso de estudio concreto, que se corresponde con la incorporación de AMD al embalse de La Pedrera, analizándose la mitigación de sus posibles inconvenientes mediante la mezcla en distintas proporciones con el agua continental suministrada habitualmente a dicho embalse mediante las infraestructuras del postravase Tajo-Segura.

## **2- Aspectos agronómicos a considerar en la aplicación de agua marina desalinizada al riego agrícola**

La incorporación de AMD a la agricultura puede producir efectos agronómicos muy diferentes, dependiendo de la calidad del agua de riego que se sustituye. Cuando el AMD, cuya conductividad eléctrica (CE) es generalmente inferior a  $0,5 \text{ dS m}^{-1}$ , sustituye a aguas de riego de baja calidad, se puede esperar un aumento de la productividad y la calidad del rendimiento de los cultivos debido a la reducción de estrés por salinidad. Por otra parte, se puede conseguir una disminución significativa en las necesidades de riego, ya que la fracción de lavado se puede reducir drásticamente. Algunos ejemplos de estos efectos beneficiosos se han documentado para diferentes cultivos en España (Zarzo *et al.*, 2013) e Israel (Ben-Gal *et al.*, 2009).

Por otro lado, cuando se sustituyen aguas de buena calidad, la reducción de la CE del AMD no implica beneficio agronómico alguno, mientras que conlleva algunos riesgos agronómicos. Además de su baja mineralización, el AMD se caracteriza por una composición química muy diferente a las de las fuentes de agua convencionales. En la composición de sales del AMD predominan los iones sodio ( $\text{Na}^+$ ) y cloruro ( $\text{Cl}^-$ ), presentando muy baja concentración de otros minerales como el calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), el magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) y el sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), así como alta concentración de elementos fitotóxicos como el boro (B). Por lo tanto, se puede afirmar que existe un problema agronómico asociado a los suministros de AMD para regadío, que debe abordarse específicamente, y que puede condicionar de forma sustancial la gestión del agua en la agricultura.

### **2.1- Carencia de nutrientes esenciales y efectos en la fertirrigación**

Las aguas naturales, junto con el contenido mineral del suelo, generalmente proporcionan niveles de nutrientes esenciales como  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  suficientes para evitar su inclusión en los programas de fertilización. Por el contrario, las concentraciones de estos minerales en el AMD son significativamente inferiores a los valores recomendados para el riego agrícola, ya que el proceso de osmosis inversa no sólo separa las sales indeseables del agua, sino que también elimina minerales que son nutrientes esenciales para el crecimiento vegetal. Por lo tanto, la sustitución de las fuentes de agua convencionales por AMD puede limitar el correcto desarrollo de los cultivos, afectando a la calidad y rendimiento de la producción, como ya ha ocurrido con cultivos de tomate, albahaca y flores en Israel (Yermeyahu *et al.*, 2007; Ben-Gal *et al.*, 2009). Para garantizar las necesidades nutricionales de los cultivos, la falta de nutrientes esenciales ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ ) puede remediarse mediante la adecuación de los programas de fertilización, pero representa un aumento en los costes de producción para los agricultores.

La Tabla 1 muestra los requerimientos nutricionales de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  característicos de los cultivos hortícolas del sureste español, así como la concentración típica de estos nutrientes en las aguas de riego convencionales del sureste español e Israel, y sus concentraciones en el AMD de varias plantas desalinizadoras de agua marina para suministro agrícola. Se observa que las necesidades de los cultivos están siendo satisfechas actualmente por el agua de riego, sobre todo en el sureste español. Es evidente que si se

sustituyen estas aguas convencionales de riego por AMD habrá que incorporar una parte importante de las necesidades de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  mediante fertilizantes, especialmente en suelos de escasa mineralización y en cultivos sin suelo. En este sentido, Ben-Gal *et al.* (2009) indican que este incremento en el coste de fertirrigación es de 3.500 \$  $\text{ha}^{-1}$  para cultivo de pimiento en invernadero.

Por lo tanto, cuando se planifica aplicar AMD en la agricultura es necesario reincorporar estos nutrientes esenciales en el agua de riego, planteándose tres posibles alternativas: (1) se pueden añadir en los postratamientos de la planta desalinizadora; (2) pueden ser añadidos por los agricultores mediante fertilizantes; o (3) se pueden incorporar mediante la mezcla del AMD con otras aguas naturales de elevada mineralización. Estas posibles opciones deben evaluarse económicamente ya que dependiendo de la estrategia seleccionada los costes de remineralización se trasladan de los productores de AMD a los agricultores.

**Tabla 1.** Requerimientos nutricionales de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  característicos de los cultivos hortícolas, concentración típica de estos nutrientes en las aguas de riego convencionales del sureste español e Israel, y en el AMD de varias plantas desalinizadoras.

Cultivos	Necesidades de $\text{Ca}^{2+}$ ( $\text{mg L}^{-1}$ )	Necesidades de $\text{Mg}^{2+}$ ( $\text{mg L}^{-1}$ )	Necesidades de $\text{SO}_4^{2-}$ ( $\text{mg L}^{-1}$ )
Cultivos hortícolas (1)	80-120	24-36	100-150
Aguas de riego convencionales	Concentración de $\text{Ca}^{2+}$ ( $\text{mg L}^{-1}$ )	Concentración de $\text{Mg}^{2+}$ ( $\text{mg L}^{-1}$ )	Concentración de $\text{SO}_4^{2-}$ ( $\text{mg L}^{-1}$ )
Sureste de España(2)	90-110	35-45	200-350
Israel (3)	45-60	20-25	60-80
AMD de diferentes plantas	Concentración de $\text{Ca}^{2+}$ ( $\text{mg L}^{-1}$ )	Concentración de $\text{Mg}^{2+}$ ( $\text{mg L}^{-1}$ )	Concentración de $\text{SO}_4^{2-}$ ( $\text{mg L}^{-1}$ )
AMD1 (4)	29	4,3	6,6
AMD2 (5)	4,2	5,5	14,4
AMD3 (6)	32-34	0	0
AMD4 (7)	40-46	0	60-80

(1) Datos representativos para cultivos hortícolas en el sureste español

(2) Datos de cerca de 50 comunidades de regantes del sureste español

(3) Yermiyahu *et al.* (2007)

(5) Planta desalinizadora de Torre Vieja, datos de Julio de 2014.

(6) Planta desalinizadora de Punta de los Vientos (Islas Canarias, Díaz *et al.*, 2013)

(7) Planta desalinizadora de Hedara en Israel (Lahav *et al.*, 2010)

(8) Planta desalinizadora de Ashkelon en Israel (Yermiyahu *et al.*, 2007)

## 2.2- Fitotoxicidad por boro

El boro es un micronutriente esencial para las plantas, que necesitan pequeñas cantidades para su crecimiento y desarrollo, pero que puede llegar a ser muy tóxico si la cantidad es ligeramente superior a la requerida. Los efectos fisiológicos adversos del exceso de boro en las plantas se han revisado extensamente (Hilal *et al.*, 2011), implicando la reducción de la división celular, con el consiguiente retraso en el crecimiento de brotes y

raíces, la inhibición de la fotosíntesis, la deposición de lignina y suberina, la disminución de la clorofila en las hojas, etc.

La concentración de boro en el AMD es mayor que en aguas convencionales, de tal manera que el riego con AMD puede aumentar el contenido de boro del suelo sustancialmente, provocando problemas de toxicidad que conducen a la disminución de rendimientos en cultivos sensibles, como ha ocurrido en Israel con concentraciones de boro de 0,6, 1,2 y 2,0 mg L<sup>-1</sup> (Yermeyahu *et al.*, 2007). El alto contenido de boro en el AMD se debe a (1) su alta concentración en el agua marina (4,5-6 mg L<sup>-1</sup>) en relación con las aguas naturales (0 a 1,5 mg L<sup>-1</sup>); y (2) el hecho de que una gran parte de boro en el agua de mar toma la forma de ácido bórico (H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>), sin carga iónica, por lo que presenta menor separación en las membrana de osmosis inversa que los iones. Por lo tanto, es necesario considerar tecnologías específicas para la reducción de boro en plantas desalinizadoras para la agricultura, como la incorporación de una segunda etapa de osmosis inversa o el uso de resinas de intercambio iónico. En ambos casos, la inversión y el coste por metro cubico de AMD aumenta (Shaffer *et al.*, 2012).

Hay distintas clasificaciones de los cultivos en función de su tolerancia al boro (Hilal *et al.*, 2011). La regulación del contenido de boro en el AMD varía en cada país. La recomendación israelí (0,3 mg L<sup>-1</sup>) protegería incluso los cultivos más sensibles, mientras que en España el requisito de las nuevas plantas desalinizadoras del Programa AGUA es de 0,5 mg L<sup>-1</sup> (Zarzo *et al.*, 2013), que es claramente un requisito del sector agrícola debido a que la norma de agua potable en España es de 1 mg L<sup>-1</sup>. Este límite de 0,5 mg L<sup>-1</sup> puede resultar inadecuado para algunos cultivos del sureste español como los cítricos.

### 2.3- Fitotoxicidad por Cl<sup>-</sup> y Na<sup>+</sup>

En el agua marina el 55% y 31% de contenido de sal son Cl<sup>-</sup> y Na<sup>+</sup>, respectivamente. Después del proceso de osmosis inversa estos iones todavía predominan en la composición del AMD y pueden producir fitotoxicidad en cultivos sensibles. La mayoría de los cultivos leñosos son sensibles a concentraciones elevadas Cl<sup>-</sup> y Na<sup>+</sup>, mientras que los cultivos anuales no son tan sensibles.

El Cl<sup>-</sup> y Na<sup>+</sup> también pueden ser absorbidos directamente por las hojas durante el riego por aspersión, causando daño foliar. El riesgo de toxicidad al Na<sup>+</sup> se reduce si el agua de riego presenta altas concentraciones de Ca<sup>2+</sup>, por lo que una evaluación razonable de la toxicidad potencial al Na<sup>+</sup> debe realizarse utilizando la relación de adsorción de sodio (RAS) del agua de riego, según se analiza en el siguiente epígrafe.

Las concentraciones de Cl<sup>-</sup> y Na<sup>+</sup> en el AMD de plantas españolas (0,56 mg L<sup>-1</sup> para AMD1 y 0,76 mg L<sup>-1</sup> para AMD2, Tabla 1) representan un riesgo moderado que podría afectar a los cultivos sensibles en su área de influencia. Los valores en las plantas israelíes son mucho más bajos (por debajo de 0,3 mg L<sup>-1</sup> en DSW3 y DSW4, la Tabla 1), de acuerdo con los valores máximos recogidos en las recomendaciones israelíes.

Experiencias a medio-largo plazo con AMD en Lanzarote (Díaz *et al.*, 2013) indican un aumento significativo en los niveles de salinidad y la concentración de Na<sup>+</sup> en el suelo tras un período de riego de 20 años, lo que indica que la sostenibilidad a largo plazo de estos sistemas de cultivo requiere (1) sustancial mejoras en la calidad AMD y (2) el aumento de las fracciones de lavado en la programación del riego para evitar acumulaciones de sal en la zona radicular de los cultivos.



## 2.4- Riesgo de sodificación de suelos

Entre los riesgos potenciales asociados al riego con AMD está la degradación de la estructura del suelo por alcalinización, que afecta en gran medida al rendimiento de los cultivos. Aparte de los efectos directos por fitotoxicidad, la concentración de  $\text{Na}^+$  puede producir efectos adversos en las propiedades físicas del suelo en forma de dispersión de arcilla, dando lugar al deterioro de la estabilidad de los agregados; a la disminución de la conductividad hidráulica del suelo; al aumento de la formación de costras en superficie, incrementando la escorrentía y la erosión del suelo; a la compactación del suelo; y a la disminución de la aireación del suelo (Muyen *et al.*, 2011).

Un indicador cuantitativo del riesgo de sodificación del suelo es la relación de adsorción de sodio (RAS), que se calcula a partir de las concentraciones de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  en el agua de riego. Los valores de RAS y la CE deben considerarse simultáneamente para evaluar el riesgo de sodificación del suelo (Ayers y Westcot, 1985).

El RAS en agua marina está por encima de 10. El agua marina osmotizada presenta altas concentraciones de  $\text{Na}^+$ , junto con muy baja o ninguna de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , por lo que generalmente resulta en valores del RAS entre 9 y 10. Los post-tratamientos en planta desalinizadora pueden añadir  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , disminuyendo el RAS en función de su intensidad. Para aguas de riego con baja concentración de sólidos disueltos totales, como ocurre con el AMD, se recomienda un  $\text{RAS} < 3$  (Ayers y Westcot, 1985). En las plantas desalinizadoras de agua marina españolas el RAS se encuentra alrededor de 6 (5.5 para AMD1 y 6.8 para AMD2, Tabla1), implicando un riesgo de sodificación del suelo moderado. En cuanto a las plantas de desalinización de Israel, el restrictivo umbral de concentración de  $\text{Na}^+$  recogido en sus recomendaciones para uso agrícola de AMD conduce a valores de RAS cercanos a cero (0.4 para AMD3 y 0.5 para AMD4, Tabla 1), lo que minimiza el riesgo de sodificación de suelos. A partir del conocimiento acumulado en Israel (Lahav *et al.*, 2010), parece que el riego con valores de RAS de entre 4 y 5,5 es probablemente aceptable (aunque no ideal), mientras que el uso a largo plazo de los valores de RAS de 6 o superiores dará lugar a un deterioro de las propiedades del suelo.

Por lo tanto, el riego con AMD requiere una vigilancia continua del suelo para detectar cualquier degradación de su estructura. Si se presenta el problema, debe ser abordado con prácticas de manejo adecuadas, tales como el aumento de la fracción de lavado en la programación del riego o la aplicación de enmiendas de  $\text{Ca}^{2+}$ . Cabe señalar que el riesgo de sodificación es más importante en suelos con contenido significativo de arcilla, mientras que en suelos arenosos el valor del RAS es menos crítico. Del mismo modo, en las zonas donde el suelo se lava regularmente por el agua de lluvia, el impacto de valores altos del RAS es menor (Duranceau *et al.*, 2011).

## 2.5- Baja alcalinidad y capacidad tampón

La alcalinidad es una medida de la capacidad tampón del agua, es decir, de la capacidad de las bases para neutralizar los ácidos. Las aguas con baja alcalinidad son muy susceptibles a cambios en el pH ya que carecen de capacidad tampón. La alcalinidad también está directamente relacionada con la dureza del agua, que se determina por la concentración de cationes multivalentes ( $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ).

Las membranas de ósmosis inversa son muy eficientes en la eliminación de bicarbonatos y carbonatos, así el agua marina osmotizada se caracteriza por un pH muy bajo y prácticamente nula alcalinidad y dureza del agua, llegando a ser incluso agresiva hacia los componentes de los sistemas de distribución de agua (Duranceau *et al.*, 2011). Para evitar la inestabilidad química del AMD antes de su incorporación a los sistemas de



suministro, se debe incrementar la alcalinidad y dureza del agua en la etapa de post-tratamiento (Birnhack *et al.*, 2010).

Se recomiendan valores de alcalinidad altos en el AMD para riego agrícola por varias razones: (1) para reducir la corrosión en los elementos metálicos de los sistemas de distribución, tales como tubos de metal, válvulas y dispositivos; (2) para evitar la corrosión de las tuberías, que produce mayores pérdidas de carga y descarga de los iones metálicos en el agua; y (3) para estabilizar el pH cuando se añadan fertilizantes ácidos o básicos. Esta última cuestión es especialmente relevante para la agricultura, ya que el AMD puede causar cambios repentinos en el pH durante la adición de fertilizantes y puede tener un profundo impacto en la disponibilidad de nutrientes y, en última instancia, en la productividad agrícola (Yermeyahu *et al.*, 2007). Por otra parte, en los sistemas de riego que han distribuido aguas duras durante largos períodos la formación de incrustaciones de carbonato cálcico es habitual, y el cambio a aguas excesivamente blandas podría desprender estas incrustaciones, afectando a filtros y contadores volumétricos, e incluso provocando el bloqueo de la tubería.

Por todas las razones anteriores, el criterios de calidad para uso agrícola del AMD de Israel establece un nivel de alcalinidad mínima recomendada de 80 mg L<sup>-1</sup> como CaCO<sub>3</sub>, y un pH lo más alto posible, aunque siempre por debajo de 8,5 (Lahav y Birnhack, 2007). Además, para controlar el potencial del AMD para precipitar o disolver carbonato cálcico, se recomienda un Potencial de Precipitación de Carbonato de Calcio (CCPP) entre 3 y 10, lo que significa un ligero potencial de precipitación de carbonatos, garantizando la estabilidad de las incrustaciones existentes.

Las aguas AMD consideradas en este estudio (AMD1, AMD2, AMD3, AMD4) presentan valores de pH adecuados para la agricultura, pero con unos niveles de alcalinidad que generalmente están por debajo de las recomendaciones israelíes, lo que indica que los procesos de post-tratamiento deben intensificarse en los suministros de AMD para uso agrícola.

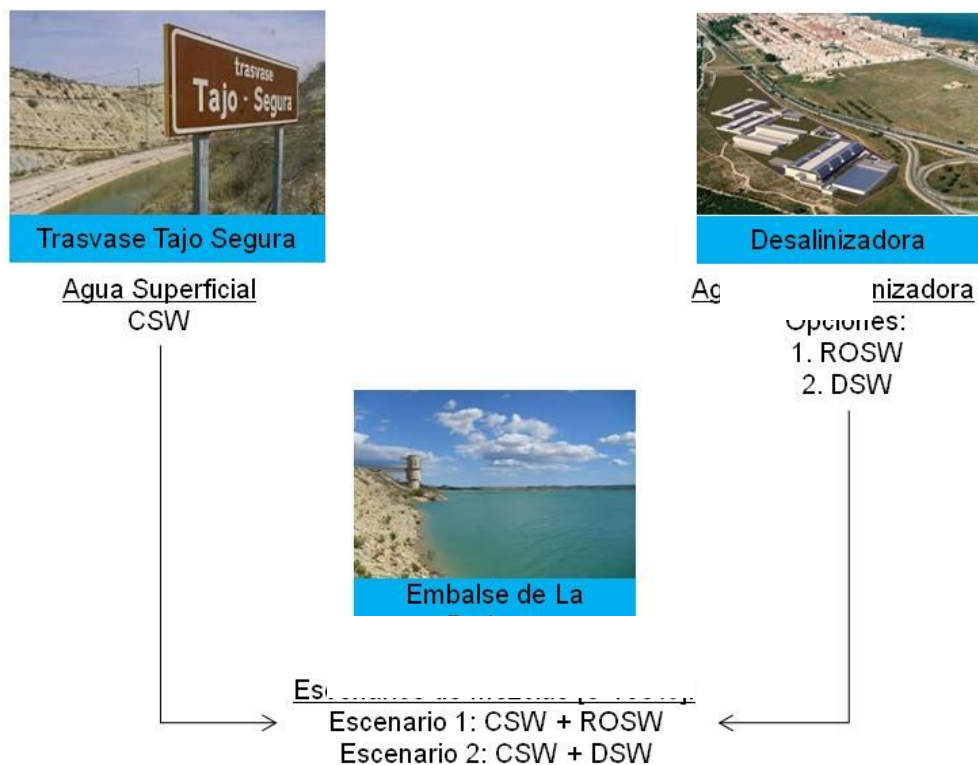
### 3- Caso de estudio del Canal del Campo de Cartagena

Actualmente se está produciendo la adquisición de AMD por parte de comunidades de regantes del interior de la cuenca del Segura, y la consiguiente solicitud de su intercambio por derechos del trasvase Tajo-Segura correspondientes a los usuarios del Canal del Campo de Cartagena en el embalse de La Pedrera. Se ha realizado una modelización predictiva de la calidad del agua de riego en el embalse de La Pedrera bajo distintos escenarios de mezcla, tomando como datos de partida las analíticas de la planta desalinizadora de Torre Vieja y del agua con que se abastece La Pedrera. Se han modelizado las mezclas considerando proporciones de cada una de las aguas entre el 0 y 100%, con incrementos del 10% (Fig. 1). La modelización se ha realizado con el programa PHREEQC, desarrollado por *United States Geological Survey*.

La Tabla 2 resume los resultados de las simulaciones, con los que se puede analizar cual es la proporción de mezcla más adecuada con el fin de garantizar las concentraciones recomendadas de nutrientes básicos para los cultivos como, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> lo que descartaría la fertilización adicional con dichos elementos. Además se analiza el efecto de las mezclas en las concentraciones de elementos fitotóxicos como Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup> y boro, así como su posible afección a cultivos sensibles.

Los resultados ponen de manifiesto que el factor más limitante de la proporción de agua desalinizada en la mezcla es el contenido en boro. Atendiendo a este criterio, la

máxima proporción para cumplir con las recomendaciones de Yermiyahu et al. (2007) sería de un 40% para AMD. Si se garantizan unos niveles de boro por debajo de  $0,4 \text{ mg L}^{-1}$  a la salida de la planta desalinizadora de Torrevieja (los análisis manejados recogen valores de  $0,56 \text{ mg L}^{-1}$ ), las proporciones de mezcla que garantizarían el resto de requerimientos agronómicos se elevan hasta el 50% de AMD. Además, el agua resultante de la mezcla al 50% presenta una buena calidad para el riego agrícola, ya que es de menor salinidad que el agua actualmente disponible en La Pedrera y su composición satisface los requerimientos agronómicos planteados en este estudio. Esta estrategia puede permitir un doble objetivo: por una parte disminuir en la medida de las posibilidades los postratamientos de las AMDs para ajustar su calidad a las necesidades de los cultivo y, por otra parte, obtener un menor coste final al de la aplicación directa de AMD.



Leyenda:

CSW (*Continental Surface Water*): Agua de origen superficial.

DSW (*Desalinated Sea Water*): Agua marina desalinizada por osmosis inversa y remineralizada.

**Figura 1.** Esquema del sistema de distribución de agua de riego a los usuarios del Canal del Campo de Cartagena y escenarios de mezcla analizados.

**Tabla 2.** Composición del agua resultante de la mezcla da AMD en distintas proporciones con el agua que abastece el embalse de La Pedrera.

Parámetro	Unidades	Porcentaje de DSW en la mezcla							
		0 %	20 %	40 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %
pH		8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	8,3
CE <sub>20</sub>	μS cm <sup>-1</sup>	934	868	799	726	688	648	606	562
T <sup>a</sup>	°C	22	22	21	21	21	20	20	20
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg L <sup>-1</sup>	195	162	139	116	105	93	82	71
Ca <sup>2+</sup>	mg L <sup>-1</sup>	98	85	71	57	50	43	36	29
Mg <sup>2+</sup>	mg L <sup>-1</sup>	42	35	27	19	16	12	8	4
Na <sup>+</sup>	mg L <sup>-1</sup>	49	57	64	72	75	79	82	86
K <sup>+</sup>	mg L <sup>-1</sup>	3,3	3,4	3,5	3,7	3,7	3,8	3,8	3,9
Cl <sup>-</sup>	mg L <sup>-1</sup>	71	86	101	117	124	132	139	147
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg L <sup>-1</sup>	279	229	173	119	90	62	34	7
B <sup>3+</sup>	mg L <sup>-1</sup>	0,13	0,22	0,30	0,39	0,43	0,47	0,52	0,56
STD	mg L <sup>-1</sup>	647	581	514	447	413	380	346	313
Dureza CaCO <sub>3</sub>	mg L <sup>-1</sup>	421	355	289	223	190	157	123	90
Alcalinidad CaCO <sub>3</sub>	mg L <sup>-1</sup>	168	147	125	103	93	82	71	60
SAR	(mmol L <sup>-1</sup> ) <sup>0,5</sup>	1,5	1,6	2,3	2,9	3,4	3,9	4,6	5,6

#### 4- Conclusiones y recomendaciones

Todos los problemas agronómicos y de gestión relacionados con la aplicación de uso AMD al riego agrícola se pueden resolver mediante una correcta regulación de este tipo de suministros, que normalice la calidad a conseguir con los postratamientos de remineralización, y que permita la optimización de su gestión conjunta con la de otros recursos hídricos disponibles en cada zona regable. Para este complejo objetivo se propone la constitución de un comité multidisciplinar que aborde esta cuestión para la singularidad del regadío español, de forma similar a como ya se ha hecho en Israel. El cumplimiento de dicha regulación minimizaría los riesgos de carencias nutricionales y fitotoxicidad; los posibles efectos perjudiciales sobre instalaciones de distribución y de riego; y las necesidades de adaptación de los agricultores y comunidades de regantes.

La necesaria adecuación del AMD a los requerimientos del riego agrícola se puede plantear de tres formas: con postratamientos de remineralización en las plantas desalinizadoras, con la reprogramación de la fertirrigación en parcela, y mediante mezcla con aguas continentales. Varios autores concluyen que si el agua desalinizada se destina a uso agrícola, la mezcla con otras aguas continentales es la estrategia más económica e interesante en la mayoría de los casos. Cuando la mezcla con aguas continentales no es posible, la incorporación de nutrientes en la planta desalinizadora es económica y ambientalmente más ventajosa, implicando además que el desempeño y coste de estos procesos los asume el productor/suministrador del agua desalinizada en lugar del agricultor.

En base a los resultados del caso de estudio, se recomienda que si se pretende consolidar un aporte regular de agua marina desalinizada con las condiciones de calidad



actuales en la planta de Torrevieja, no se supere el porcentaje del 40% en la mezcla, porcentaje que se podría elevar al 50% si se mantiene la concentración de boro en la planta de Torrevieja por debajo de 0,4 mg L<sup>-1</sup>.

## 5- Agradecimientos

Este trabajo sintetiza en contenido del estudio “Antecedentes y problemática de la aplicación de aguamarina desalinizada al riego agrícola”, financiado por el Sindicato Central de Regantes del Acueducto Tajo-Segura (SCRATS) y disponible en <http://www.scrats.es/memorias-e-informes.html>.

## 6- Bibliografía

- Ayers, R.S., Westcot, D.W., 1985. Water quality for agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper 29. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma.
- Ben-Gal, A., Yermiyahu, U., Cohen, S., 2009. Fertilization and blending alternatives for irrigation with desalinated water. *J. Environ. Qual.* 38, 529–536.
- Birnhack, L., Shlesinger, N., Lahav, O., 2010. A cost effective method for improving the quality of inland desalinated brackish water destined for agricultural irrigation. *Desalination* 262, 152–160.
- Díaz, F.J., Tejedor, M., Jiménez, C., Grattanb, S.R., Dorta, M., Hernández, J.M., 2013. The imprint of desalinated seawater on recycled wastewater: Consequences for irrigation in Lanzarote Island, Spain. *Agric. Water Manage.* 116, 62–72.
- Duranceau, S.J., Pfeiffer-Wilder, R.J., Douglas, S.A., Peña-Holt, N., Watson, I.C., 2011. Post-treatment stabilization of desalinated water. Water Research Foundation, Denver.
- FAO, 2006. Water desalination for agricultural applications. Proceedings of the FAO Expert Consultation on Water Desalination for Agricultural Applications. Eds. Beltrán JM, Koo-Oshima S. Food and Agriculture Organization, Roma.
- Hilal, N., Kim, G.J., Somerfield, C., 2011. Boron removal from saline water: a comprehensive review. *Desalination* 273, 23–35.
- Lahav, O., Birnhack, L., 2007. Quality criteria for desalinated water following post treatment. *Desalination* 207, 286–303.
- Lahav, O., Kochva, M., Tarchitzky, J., 2010. Potential drawbacks associated with agricultural irrigation with treated wastewaters from desalinated water origin and possible remedies. *Water Sci. Technol.* 61, 2451–2460.
- Muyen, Z., Moore, G.A., Wrigley, R.J., 2011. Soil salinity and sodicity effects of wastewater irrigation in South East Australia. *Ag. Water Manage.* 99, 33–41.
- Shaffer, D.L., Yip, N.Y., Gilron, J., Elimelech, M., 2012. Seawater desalination for agriculture by integrated forward and reverse osmosis: Improved product water quality for potentially less energy. *J. Membrane Sci.* 415–416, 1–8.
- Yermiyahu, U., Tal, A., Ben-Gal, A., Bar-Tal, A., Tarchitzky, J., Lahav, O., 2007. Rethinking desalinated water quality and agriculture. *Science* 318, 920–921.
- Zarzo, D., Campos, E., Terrero, P., 2013. Spanish experience in desalination for agriculture. *Desalin. Water Treat.* 51, 53–66.



## APLICACIÓN DE ULTRASONIDOS PARA EL CONTROL DE ALGAS EN AGUAS REGENERADAS ALMACENADAS EN BALSAS DE RIEGO

*Maestre Valero, J.F.<sup>1</sup>, Pedrero Salcedo, F.<sup>2</sup>, Soto García, M.<sup>3</sup>, Alarcón J.J.<sup>4</sup>*

<sup>1</sup> Investigador, Departamento de Riego, Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CEBAS-CSIC), Campus Universitario de Espinardo, 30100, Murcia, España, Tel: +34-968396223. Fax: +34-968396213, Email: [jmaestre@cebas.csic.es](mailto:jmaestre@cebas.csic.es)

<sup>2</sup> Investigador, Departamento de Riego, Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CEBAS-CSIC), Campus Universitario de Espinardo, 30100, Murcia, España, Tel: +34-968396223. Fax: +34-968396213, Email: [fpedrero@cebas.csic.es](mailto:fpedrero@cebas.csic.es)

<sup>3</sup> Dirección técnica, Comunidad de Regantes del Campo de Cartagena. Paseo Alfonso XIII, 22, 30201 Cartagena, Murcia, Spain, Tel: +34-968514200, Email: [mariano.soto@crcc.es](mailto:mariano.soto@crcc.es)

<sup>4</sup> Investigador, Departamento de Riego, Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CEBAS-CSIC), Campus Universitario de Espinardo, 30100, Murcia, España, Tel: +34-968396303. Fax: +34-968396213, Email: [jarcon@cebas.csic.es](mailto:jarcon@cebas.csic.es)

### Resumen

En las regiones áridas y semiáridas las balsas de riego son infraestructuras que garantizan el suministro de agua a los cultivos. Sin embargo, favorecen la proliferación de algas provocando serios problemas en la calidad del agua que afectan negativamente a los sistemas de riego (filtración, emisores, elementos auxiliares,...). Ante esta problemática, el objetivo de este estudio fue evaluar, a escala real, el efecto de los ultrasonidos sobre parámetros físico-químicos y microbiológicos de interés agronómico en el agua de riego almacenada y sobre la presencia de algas en el agua.

El ensayo se realizó en tres balsas de aguas regeneradas y una de agua suministrada por la Comunidad de Regantes del Campo de Cartagena, principalmente procedente del Trasvase Tajo-Segura. Equipos de emisión de ultrasonidos se instalaron en 2 de las 4 balsas para tratar de reducir la presencia de algas. Quincenalmente, se determinó la calidad del agua mediante una sonda multiparamétrica y el análisis de muestras de agua en laboratorio.

Los resultados del experimento manifiestan que los ultrasonidos controlan el crecimiento de microalgas manteniendo la concentración de éstas en valores aceptables para evitar problemas de obturación en los sistemas de riego y mejorando por tanto la calidad del agua almacenada.

### 1- Introducción, Objetivos

En las regiones áridas y semiáridas, como el sureste de España, la disponibilidad de agua de riego en cantidad y calidad suficiente se ha convertido en un factor limitante de la actividad agrícola que ha potenciado la competitividad por los recursos hídricos (Soto García et al., 2014). En estas regiones, donde la escasez y la disponibilidad de agua varían estacionalmente, las balsas de riego son una instalación común para garantizar el suministro



de agua a los cultivos pues permiten amortiguar el desfase temporal que se produce entre la disponibilidad de los recursos y su demanda. En el caso particular de la Cuenca del Segura, región donde se ha realizado este ensayo, existen más de 15.000 balsas de riego (Maestre-Valero et al., 2011).

A pesar de los beneficios expuestos y de que son requisito fundamental para la sostenibilidad del riego en esta cuenca deficitaria, la gran cantidad de nutrientes que contienen las aguas de riego almacenadas en balsas, junto con las condiciones climáticas adecuadas, provocan el crecimiento y desarrollo de algas de tamaño microscópico que pueden provocar problemas técnicos y de calidad del agua (Karico, 2000; Brainwood et al., 2004; Sperling et al., 2008). Además, cuando el agua almacenada se destina a riego localizado, se producen frecuentemente obturaciones de los emisores que afectan principalmente a la uniformidad de aplicación de agua de riego en parcela, lo cual conduce a variaciones en el crecimiento y reducciones en la productividad del cultivo (Adin et al., 1989; Adin y Sacks, 1991; Bucks y Nakayama, 1991). Este último inconveniente se agudiza más aún cuando existe una concentración disponible de nutrientes elevada para el desarrollo de algas como es frecuente en las aguas regeneradas.

En la bibliografía se pueden encontrar diferentes técnicas de mejora de la calidad del agua almacenada dirigidas a reducir principalmente la presencia de micro y macro algas, como son las técnicas biológicas de implementación de paja de cebada (Purcell et al., 2012) o introducción de bacterias de secreción de enzimas líticas (Peng et al., 2003) en el agua, las técnicas químicas de adición de alguicidas como el sulfato de cobre o el permanganato potásico y las técnicas físicas como el uso de coberturas de sombreo suspendidas (Martínez-Alvarez et al., 2009) o flotantes (Headley y Tanner, 2012) y los ultrasonidos (Heng et al., 2007).

Entre estas técnicas, este estudio evaluó el efecto de los ultrasonidos sobre la presencia de algas y sobre los parámetros físico-químicos y microbiológicos de interés agronómico del agua regenerada almacenada en balsas de riego.

## 2.- Materiales y métodos

### Las balsas de riego y los ultrasonidos

El ensayo se llevó a cabo en cuatro balsas de riego. Tres de ellas almacenaron aguas regeneradas (San Javier; SJ, Alcázares 1; AC1 y Alcázares 2; AC2) y en dos de las balsas que almacenaron aguas regeneradas se instalaron equipos de ultrasonidos (1 equipo por balsa; modelo TISU XXI). Los equipos se instalaron a principios de junio. La balsa restante almacenó agua del transvase Tajo – Segura; TR. Los sistemas de tratamiento de ultrasonidos para el control de algas son sistemas submarinos de sonido, de alta especificidad y que emiten ondas de sonido ultrasónico para destruir las algas. Las ondas originan la rotura de los diferentes orgánulos celulares tales como las vacuolas, la pared celular o la membrana y las vesículas de gas de las algas verde-azuladas (Rajasekhar et al., 2012). La tabla 1 muestra las características de las balsas.

**Tabla 1.** Características de las balsas seleccionadas en el experimento.

Balsa	Localización	Tipo de agua	Dimensiones (L x A x P)	Caudal depuradora (m <sup>3</sup> /día)
La Trinchera (TR)	37° 48' N 0° 55' W	Tajo - Segura	450 x 120 x 6	-
San Javier (SJ)	37° 47' N 0° 49' W	Regenerada	120 x 70 x 4	Invierno = 7.000 Verano = 15.000
Alcázares 1* (AC1)	37° 44' N 0° 53' W	Regenerada	110 x 105 x 2	Invierno = 5.000 Verano = 10.000
Alcázares 2* (AC2)	37° 44' N 0° 53' W	Regenerada	100 x 13 x 2	Invierno = 5.000 Verano = 10.000

\*Instalación de un equipo de ultrasonidos



### Descripción del ensayo y calidad del agua

El experimento se realizó durante 3 meses, desde final de mayo a final de agosto de 2014. Cada dos semanas se recogieron muestras de agua de cada balsa (1L), que se transportaron directamente al laboratorio en nevera portátil y se almacenaron a 5°C antes de ser procesadas. Se realizaron análisis en el laboratorio tanto físico-químico como microbiológico. Los análisis físicoquímicos consistieron en la determinación mediante (ICP-OES ICAP 6500 Duo Thermo, Inglaterra) de la concentración de los macronutrientes (Na, K, Ca, Mg), micronutrientes (Fe, B, Mn) y metales pesados (Ni, Cd, Cr, Cu, Pb, Zn) y los sólidos en suspensión (filtrado a vacío en un matraz Kitasato con embudo Buchner y pesada de filtros; poro = 0,47 mm y estufa a 105°C). Los análisis microbiológicos consistieron en la detección del número total de *E. coli* presente en un volumen de 100 mL, por el método de filtración por membrana. Además, se realizaron registros para el perfil de profundidad de la calidad del agua in situ mediante una sonda multiparamétrica modelo Hidrolab DS.5 (OTT hidromet, Kempton, Alemania) dotada de sensores para determinar temperatura, conductividad eléctrica (CE) y clorofila-a (Cl-a; proxy de microalgas). Las muestras y sondeos se tomaron y realizaron siempre en el espacio horario de entre la 13:00 h y 16:00 h.

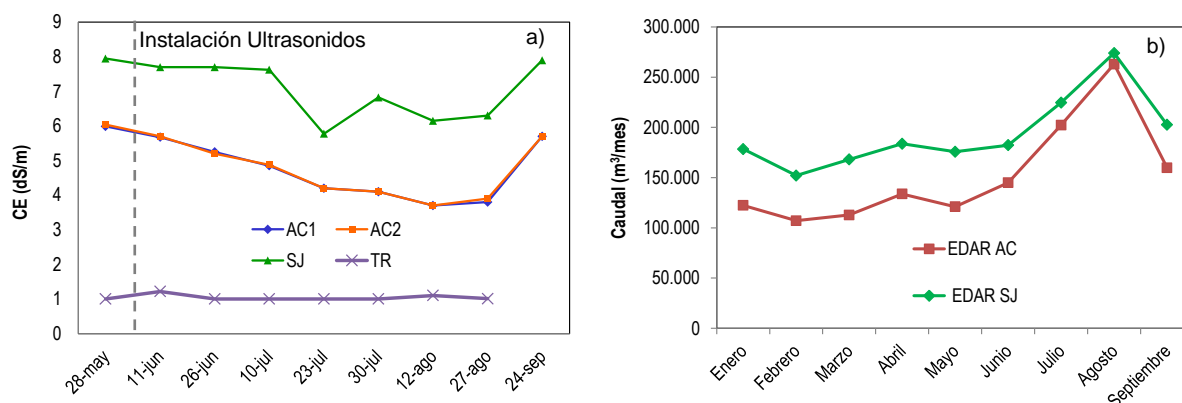
Adicionalmente, se evaluó de forma visual la evolución de la cantidad de macrófitas en las balsas de riego durante el periodo de ensayo.

### 3.- Resultados y discusión

Los parámetros físico-químicos analizados in situ no presentaron variaciones en el perfil de profundidad, de modo que los resultados para estos parámetros muestran el valor medio para todo el perfil de profundidad en cada fecha de muestreo.

#### Conductividad eléctrica (CE)

Las balsas AC1, AC2 y SJ presentaron valores más elevados de salinidad que TR, durante el periodo de muestreo (Fig. 1a). La evolución de la CE en las tres balsas de almacenamiento de aguas regeneradas fue similar, mostrando una reducción progresiva en la época estival (debido al aumento del caudal tratado) y un aumento al finalizar la misma (Fig. 1b).

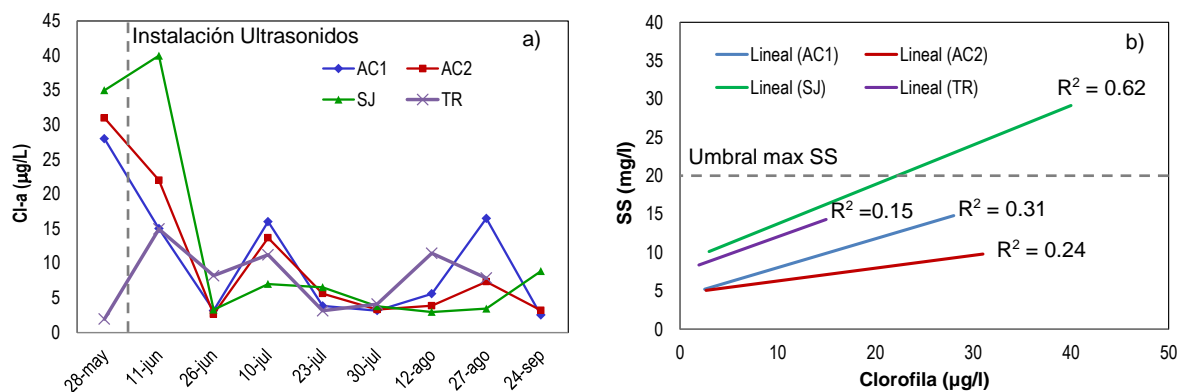


**Figura 1.** Evolución de (a) la conductividad eléctrica (CE) para las balsas AC1, AC2, SJ Y TR y (b) del caudal de las EDAR de Los Alcázares y San Javier en el periodo de muestreo.

#### Clorofila – a (Cl-a) y sólidos en suspensión (SS)

La concentración de Cl-a (proxy de microalgas) en todas las balsas ensayadas permaneció en un rango de valores entre 5 - 15  $\mu\text{g/l}$ ; excepto en AC1, AC2 y SJ al inicio del ensayo antes de la instalación de los equipos de ultrasonidos en AC1 y AC2. Durante los dos primeros muestreos (mayo y junio), la concentración de Cl-a de la balsa SJ presentó valores elevados (35-40  $\mu\text{g/l}$ ) y la concentración de Cl-a en las balsas AC1 y AC2 osciló entre 20 - 30  $\mu\text{g/l}$  (Fig. 2a). Una vez se instalaron los equipos de ultrasonidos, se observó una reducción significativa en la concentración de Cl-a y por tanto de microalgas en las balsas AC1 y AC2 que alcanzó a finales de junio valores en torno a 5  $\mu\text{g/l}$ . A pesar de que en la balsa SJ no se instaló ningún equipo de ultrasonidos, se detectó una reducción similar en la concentración de Cl-a a las balsas AC1 y AC2. Esta reducción se atribuyó principalmente a las frecuentes limpiezas manuales de las algas (*Potamogeton Pectinatus* y *Cladophora Glomerata*) en la balsa SJ realizadas por los operarios de la EDAR (Figura 3).

Como era de esperar, la concentración de sólidos en suspensión (SS) mostró una cierta relación con la concentración de Cl-a (Fig. 2b). Esta relación fue más elevada para las balsas que mostraron una mayor cantidad de macroalgas en descomposición (SJ > AC1 > AC2 > TR). Es importante señalar que solamente en el segundo muestreo la balsa SJ presentó valores de SS superiores a los máximos establecidos por el Real Decreto 1620/2007 que regula la reutilización de las aguas regeneradas para usos agrícolas en el caso 2.1



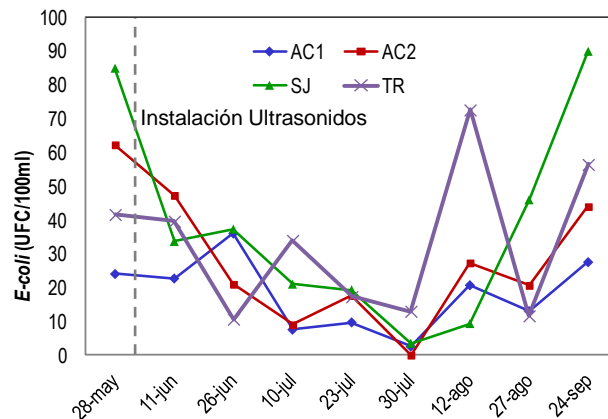
**Figura 2.** Evolución de (a) la concentración de la clorofila-a y (b) regresiones lineales entre la concentración de clorofila-a y los sólidos en suspensión para las balsas AC1, AC2, SJ Y TR en el periodo de muestreo.



**Figura 3.** Limpieza manual de la balsa SJ durante el periodo del ensayo.

*Escherichia coli* (E-coli)

La concentración de *E-coli* se encontró bajo el valor máximo admisible del Real Decreto 1620/2007 para el uso agrícola más restrictivo (100 UFC/100 mL). El valor medio de la concentración de *E-coli* durante el periodo de ensayo y a partir de la instalación de los equipos de ultrasonidos fue de 17,4 UFC/100 mL y 23,4 UFC/100 mL en las balsas AC1 y AC2, respectivamente, mientras que en las balsas SJ y TR estos valores fueron algo superiores 32,5 UFC/100 mL y 31,9 UFC/100 mL, respectivamente. Los valores inferiores de *E-coli* en las balsas AC1 y AC2 se atribuyen a un efecto combinado de la aplicación de ultrasonidos (Toscano et al., 2013) y a un proceso de depuración natural producido por la incidencia de la radiación solar (Sala y Millet, 1997).



**Figura 3.** Evolución de la concentración *E-coli* para las balsas AC1, AC2, SJ Y TR en el periodo de muestreo.

### Elementos nutricionales

Los macronutrientes como nitrógeno y fósforo son una preocupación ambiental por sus roles como factores limitantes en el crecimiento de plantas acuáticas que pueden causar la degradación de la calidad del agua y la aceleración del proceso de eutrofización. En las balsas de aguas regeneradas estudiados, la concentración de  $PO_4^{3-}$  fue superior al límite establecido de riesgo de eutrofización (1,5 mg/l) (Sawyer et al., 1994), particularmente en SJ donde tanto las concentraciones de  $NO_3^-$ ,  $PO_4^{3-}$  y K fueron ligeramente superiores a los de AC1 y AC2 (Tabla 2). Tras comparar los valores de  $NO_3^-$ ,  $PO_4^{3-}$  y K del efluente proporcionados por ESAMUR (Entidad de Saneamiento y Depuración de Aguas Residuales de la Región de Murcia; datos no mostrados), no se observó ningún efecto del embalsamiento ni de los ultrasonidos en la concentración de los mismos, debido probablemente al corto tiempo de residencia de las aguas de riego en las balsas. En la balsa TR, los valores durante todo el ensayo fueron inferiores a los límites de riesgo de eutrofización.

En el caso de los elementos fitotóxicos,  $Cl^-$  y  $Na^+$  presentaron concentraciones muy superiores en las balsas con agua regenerada, especialmente la balsa SJ. En cuanto al B, se observó una concentración de 1 mg/L en las balsas AC y SJ. Estos valores elevados de Na,  $Cl^-$  y B podrían inducir toxicidad en cultivos como por ejemplo naranjo, melocotonero, alcachofa, etc. (Navarro, 2010).

**Tabla 1.** Valores medios de concentración de macronutrientes, micronutrientes y aniones en las balsas (TR, AC1, AC2 y SJ) durante el ensayo.

	TR	AC1	AC2	SJ

	Macronutrientes			
Na (mg/L)	66,51	729,18	753,52	1218,03
K (mg/L)	6,19	39,91	40,31	56,55
Ca (mg/L)	81,87	151,28	151,6	156,28
Mg (mg/L)	44,12	148,63	153,35	201,83
P (mg/L)	0,10	1,92	1,85	2,66
S (mg/L)	78,20	223,28	224,92	232,02
	Micronutrientes			
B (mg/L)	0,11	0,92	0,91	0,88
Mn (mg/L)	0,23	0,61	0,61	0,77
	Aniones			
Cl <sup>-</sup> (mg/L)	99,1	1132,8	1054,8	1899,4
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	0,93	2,32	2,34	4,72
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg/L)	1,00	5,41	4,78	6,28
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	233,9	677,8	628,9	671,9

### Comparativa económica ultrasonidos vs limpieza manual

La balsa SJ requirió limpieza manual de macroalgas durante los meses en los que las temperaturas son más altas en la zona, época en la que el crecimiento de algas supone un problema, pese a la mayor tasa de renovación del agua. Las limpiezas se sucedieron durante 5 meses aproximadamente con una periodicidad de 4 semanas. Se ha identificado que fueron necesarias 5 limpiezas durante el periodo de tiempo del ensayo, además del mes anterior y el mes siguiente. Cada limpieza tuvo una duración de 5 días, y participaron 4 operarios, que dedicaron su jornada laboral al completo (7 h) a la limpieza de la balsa. El salario de un operario se ha fijado en 15 €/h. Por lo tanto, se estima el coste de cada limpieza en 2.100€ (5 días · 4 operarios · 7 h/operario · 15 €/h). Por consiguiente, el monto económico de las 5 limpiezas realizadas asciende a 10.500 €. Este gasto se considera anual, ya que cada año se deberán realizar estas limpiezas de macroalgas coincidiendo con el incremento de las temperaturas del agua.

Por otro lado, las balsas AC1 y AC2 usaron los equipos de ultrasonidos para el control del crecimiento de algas en ellos. El coste de inversión para la instalación completa del equipo de ultrasonidos fue de 10.000 €, (4.500 € coste de los dos equipos de ultrasonidos y 5.500 € el de la obra civil en su caso e instalación eléctrica necesaria). El consumo energético total de los dos aparatos de ultrasonidos es de 300 Wh y el precio medio del kWh se ha fijado en 0,12 €, por lo que el consumo energético por hora de los aparatos de ultrasonidos es de 0,036 €/h. Al año, el coste de la energía consumida por los aparatos ascendería a 315 € aproximadamente. Además, el mantenimiento anual eléctrico y de limpieza que pueden requerir estos aparatos de ultrasonidos se estima en 1 h de trabajo de un técnico cada 15 días aproximadamente, lo que supondría un coste de 360€.

Al año, entre consumo energético y mantenimiento, los aparatos de ultrasonidos de las balsas AC1 y AC2 supondrían un coste de 675 €/año. Comparando este dato con el coste de limpieza manual de la balsa de SJ (10.500 €/año), se puede afirmar que en un año aproximadamente la inversión que supone la implantación del aparato de ultrasonidos en la balsa de SJ quedaría totalmente amortizada. La tabla 3 muestra la comparativa económica de ambos métodos; ultrasonidos y limpieza manual.

**Tabla 3.** Datos económicos de la limpieza manual de la balsa SJ y de los equipos de ultrasonidos de AC1 y AC2.

Limpieza manual		Equipo de Ultrasonidos	
<b>Coste anual</b>		<b>Inversión inicial</b>	
Coste por cada limpieza		Equipos	4.500 €
4 operarios	2.100 €	Obra e instalación eléctrica	5.500 €
5 días		<b>Total Inversión</b>	10.000 €
7 h/día		<b>Coste energético anual</b>	
15 €/h		Consumo (300 Wh)	315 €
5 limpiezas/año		Coste kW·h (0,12 €)	
<b>TOTAL L. MANUAL</b>	<b>10.500 €</b>	Activo 365 días 24 h	
		<b>Coste limpieza equipo (anual)</b>	
		Nº Limpiezas/año (24)	360€
		Tiempo limpieza (1h)	
		Coste hora (15 €)	
		<b>TOTAL ULTRASONIDOS</b>	<b>10.675€</b>

#### 4.- Conclusiones y recomendaciones

Aunque el almacenamiento de las aguas de riego produce múltiples beneficios tanto hidráulicos (regulación del agua disponible) como físico-químicos (reducción de sólidos en suspensión, etc.), como biológicos (desinfección solar), en regiones semi-áridas con un alto potencial agrícola como la Región de Murcia, el crecimiento de algas puede suponer un factor determinante en el deterioro de la calidad del agua de riego.

La implantación de equipos de ultrasonidos en balsas de riego permite controlar el crecimiento de microalgas, manteniendo la concentración de éstas en valores aceptables para evitar problemas de obturación en los sistemas de riego. La concentración de sólidos en suspensión presentes en las balsas estudiadas presentó cierta relación con la concentración de clorofila-a (microalgas). A nivel de macroalgas, la aplicación de ultrasonidos mejoró la calidad del agua almacenada, aunque no es capaz por sí solo de erradicarlas completamente.

No se ha observado ningún efecto de los ultrasonidos sobre la concentración de macronutrientes, micronutrientes, aniones y la conductividad eléctrica.

La combinación de ultrasonidos junto con la probable desinfección natural del agua por efecto de la radiación solar ha mostrado ser eficaz para evitar el crecimiento de *E-coli* en las balsas de riego por encima de los umbrales legalmente permitidos por decreto.

El coste económico que supone la implantación de un equipo de ultrasonidos, se podría amortizar en un año aproximadamente, comparando con el coste que supone la extracción manual de algas en las balsas.

#### 5.- Bibliografía





Adin, A. & Sacks, M. (1991). Dripper clogging factors in wastewater irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 117 (6), 813–826.

Brainwood, A., Burgin, S. & Maheshwari, B. (2004). Temporal variations in water quality of farm dams: impacts of land use and water sources. *Agricultural Water Management*. 70, 151–175.

Bucks, D. & Nakayama, F. (1991). Water quality in drip/trickle irrigation: A review. *Irrigation Science*. 12 (4), 187–192.

Heng, L., Jun, N., Wen-jieb H. & Guibaia, L. (2007). Algae removal by ultrasonic irradiation–coagulation. *Desalination* 239, 191–197.

Karico (2000). Technical report (I): the survey of pollution sources of water for the agricultural use (in Korean). Korean Agricultural and Rural Infrastructure Cooperation, pp. 1–626.

Maestre Valero, José Francisco (2011). Efectos de la aplicación de coberturas de sombreado suspendidas sobre balsas de riego. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cartagena.

Navarro, T.M. (2010). Reutilización de aguas regeneradas. Aspectos tecnológicos y jurídicos. Fundación Instituto Euromediterráneo del Agua.

Purcell, D., Parsons, S.A., Jefferson, B., Holden, S., Campbell, A., Wallen, A., Chipps, M., Holden, B. & Ellingham, A. (2012). Experiences of algal bloom control using green solutions barley straw and ultrasound, an industry perspective. *Water and Environment Journal* 2, 148–56.

Peng, C., Wu, G., Xi, Y., Xia, Y., Zhang, T. & Zhao, Y. (2003). Isolation and identification of three algae-lysing bacteria and their lytic effects on bluegreen algae (cyanobacteria). *Research of Environmental Sciences* 16, 37–40.

Rajasekhar, P., Fan, L., Nguyen, T. & Roddick, F.A. (2012). A review of the use of sonication to control cyanobacterial Blooms. *water research* 46, 4319–4329

Sala, L. & Millet, X. (1997). Aspectos básicos de la reutilización de las aguas residuales regeneradas para el riego de campos de golf. *Apuntes de las jornadas técnicas del golf*, 1995.

Sperling, E., Da Silva, A.C. & Lodolf, L.N. (2008). Comparative eutrophication development in two Brazilian water supply reservoirs with respect to nutrient concentrations and bacteria growth. *Desalination*. 226, 169–174.

Sawyer, C., McCarty, P. L., & Parkin, G.F. (1994). *Chemistry for Environmental Engineering*. Fourth Ed. p. 552–566 y 596–601.

Soto García, M., Martínez Álvarez, V. y Martín Górriz, B. (2014). El regadío en la Región de Murcia. Caracterización y análisis mediante indicadores de gestión. Sindicato Central de Regantes del Acueducto Tajo-Segura 268 pp.

Toscano, A., Hellio, C., Marzo, A., Milani, M., Leuret, K., Giuseppe, L., Cirelli, G.L. & Langergraber, G. (2013). Removal efficiency of a constructed wetland combined with ultrasound and UV devices for wastewater reuse in agriculture. *Environmental Technology*, 34:15, 2327–2336





## EVALUACIÓN DE UN NUEVO REGADÍO A LO LARGO DE 10 AÑOS: BALANCES HÍDRICOS, CALIDAD DEL RIEGO Y CONTAMINACIÓN POR SALES Y NITRATOS

*Merchán, D.<sup>(1)</sup>, Causapé, J.<sup>(2)</sup>, Abrahao, R.<sup>(3)</sup>, García-Garizabal, I.<sup>(4)</sup>*

<sup>1</sup> Investigador Predoctoral, Instituto Geológico y Minero de España, C/ Manuel Lasala 44 9ºB, 50006 Zaragoza, [d.merchan@igme.es](mailto:d.merchan@igme.es)

<sup>2</sup> Científico Titular, Instituto Geológico y Minero de España, C/ Manuel Lasala 44 9ºB, 50006 Zaragoza, [j.causape@igme.es](mailto:j.causape@igme.es)

<sup>3</sup> Profesor, Universidad Federal de Paraíba, Cidade Universitária, Joao Pessoa, Paraíba, 58051-970, Brasil, [raphael@cear.ufpb.br](mailto:raphael@cear.ufpb.br)

<sup>4</sup> Investigador PROMETEO, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Km 30.5 Vía Perimetral, Campus Gustavo Galindo, Guayaquil, Ecuador, [ikerggarizabal@gmail.com](mailto:ikerggarizabal@gmail.com)

### Resumen

La transformación al regadío es frecuente en zonas semiáridas a lo largo del mundo por sus numerosas ventajas, pero el regadío también es considerado como el principal consumidor de recursos hídricos y la principal fuente de contaminación difusa. En este trabajo se presenta una evaluación de la calidad del riego y del lixiviado de sales y nitratos en una cuenca hidrológica (7,38 km<sup>2</sup>) representativa de los regadíos presurizados de la cuenca del Ebro. El estudio abarca 10 años hidrológicos: antes (2004-2005), durante (2006-2008) y después (2009-2013) de la transformación de secano a regadío. Para este periodo, se realizaron balances hídricos y se obtuvieron indicadores de la calidad del riego a partir de éstos. Con la medida de la concentración de sales y nitratos en los diferentes componentes, se estimó la masa de estos contaminantes procedentes de la zona regable (352 ha), y se obtuvieron índices de contaminación. La eficiencia de riego alcanzó un 76,1%, mientras que las pérdidas de eficiencia se debieron a la evaporación y arrastre del riego por aspersión (13,5%) y al drenaje del riego (10,4%). La eficiencia de riego aumentó (1,05% año<sup>-1</sup>) y la fracción de drenaje disminuyó (0,95% año<sup>-1</sup>). Sin embargo, no se garantizó un incremento en la calidad del riego ya que el déficit hídrico también se incrementó (0,95% año<sup>-1</sup>) situándose en 17,8% al final del periodo de estudio. Tanto las masas exportadas como los índices de contaminación se incrementaron significativamente con la transformación al riego. Sin embargo, los valores obtenidos se encuentran por debajo del umbral de los regadíos considerados como más sostenibles. Mejoras en el manejo del riego, que tengan en cuenta la humedad del suelo y la velocidad del viento podrían incrementar de forma considerable la calidad del riego y disminuir el lixiviado y los índices de contaminación.

### 1- Introducción y objetivos

Durante las últimas décadas, la transformación de zonas de secano a agricultura de regadío es un proceso común en multitud de localizaciones por todo el mundo (FAO, 2003a). Las superficies transformadas experimentan incrementos en la productividad, así como una mayor estabilidad de las cosechas y diversidad en los cultivos. Aquellas cuencas hidrológicas en las que una alta proporción de su superficie se ve sometida a la transformación al regadío, en particular en zonas áridas o semiáridas, experimentan

importantes cambios en su comportamiento hidrológico, tanto desde un punto de vista cuantitativo como en lo que respecta a la calidad del agua (e.g., Abrahão et al., 2011a, 2011b).

La progresiva escasez de agua que se constata en multitud de zonas del planeta pone de manifiesto la necesidad de evaluar los distintos usos del agua. En este sentido, la agricultura de regadío es reconocida como la principal consumidora de recursos hídricos del mundo (FAO, 2003b), lo que hace necesario la ejecución de estudios que evalúen la calidad del riego e incluyan, entre otros, indicadores de su eficiencia.

La eficiencia del riego a nivel de parcela depende de muchos factores concretos (tipo de suelo, diseño del sistema de riego, prácticas de riego, etc.). Por tanto, la eficiencia de riego varía de forma considerable tanto espacial como temporalmente, lo que hace difícil que unas “buenas prácticas agrícolas” sean de extensa aplicación, sino que estas prácticas deberán ser adaptadas al caso de estudio concreto (e.g., Hernández y Uddameri, 2010).

Por otro lado, la agricultura de regadío está reconocida como la principal fuente de contaminación difusa, por el alto lixiviado de sales y nitratos de zonas en riego, entre otros problemas ambientales (EPA, 1992). El lixiviado de sales es un requisito de la agricultura de regadío, ya que la acumulación de sales en los perfiles del suelo puede provocar daños en los cultivos, originando pérdidas de productividad e incluso forzando, en casos extremos, el abandono de las tierras. Sin embargo, los retornos de riego enriquecidos en sales pueden afectar la calidad de masas de agua, impactando tanto sistemas de abastecimiento humano como ecosistemas.

En lo que respecta a la contaminación por nitratos, es uno de los principales problemas de la agricultura en general por los riesgos asociados para la salud humana y para los ecosistemas (Sutton et al., 2011). La aplicación de fertilización nitrogenada normalmente no se corresponde con las necesidades de los cultivos (tanto en cantidad total como en distribución temporal a lo largo del ciclo del cultivo) lo que hace que haya abundante nitrógeno en el suelo para ser lixiviado por eventos de precipitación o riego que originen drenaje. El lixiviado de nitratos no sólo supone una pérdida de eficiencia en las inversiones de los agricultores, sino que además origina incrementos de concentración de nitratos en las masas de agua receptoras de los retornos de riego.

Aspectos relativos al balance hídrico, la calidad del riego o el lixiviado de sales y nitratos han sido objeto de numerosos estudios tanto en España como a nivel internacional. Sin embargo, este trabajo presenta una aproximación diferente ya que lo que se evalúa es la transformación de una zona de secano a regadío presurizado.

En este contexto, los objetivos de este trabajo son: (i) evaluar los cambios en el balance hídrico tras la transformación de secano a regadío presurizado; (ii) estudiar la evolución de la calidad del riego durante los años tras la transformación; (iii) evaluar los cambios en la contaminación por sales y nitratos originados por la transformación al riego presurizado; y (iv) comparar la contaminación que se origina con la de otras zonas regadas en la cuenca del Ebro.

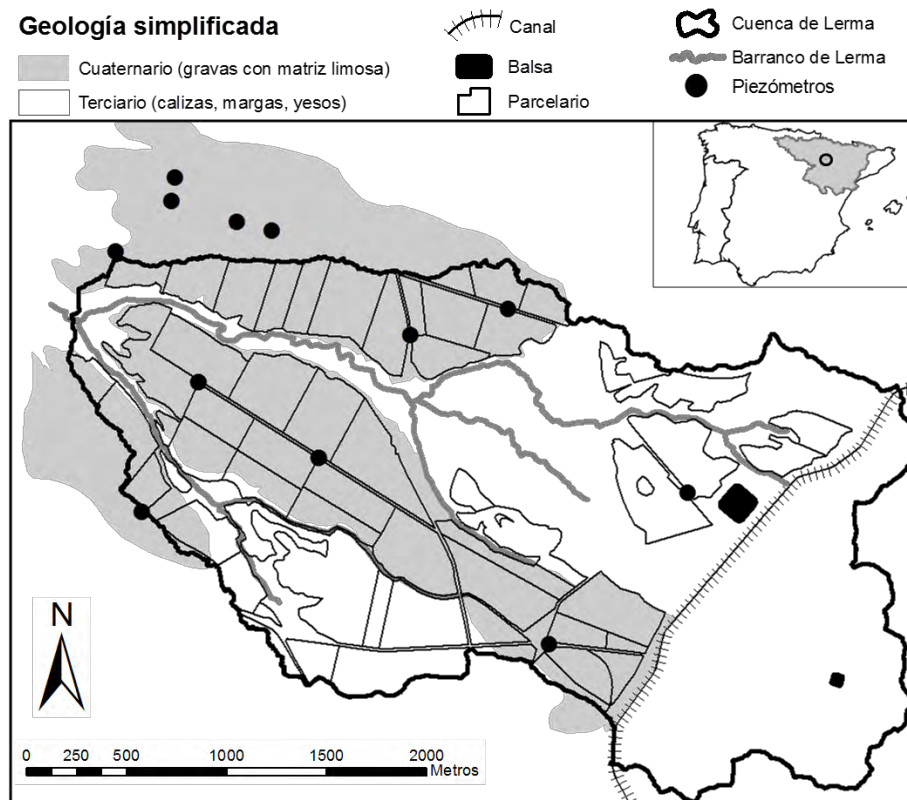
## **2- Zona de estudio**

La zona de estudio es la cuenca hidrológica del Barranco de Lerma (Ejea de los Caballeros, Zaragoza, 7,38 km<sup>2</sup>, Fig. 1), localizada en la margen izquierda del valle del Ebro. El 49% de su superficie fue transformada de secano a regadío de forma gradual entre los años 2006 y 2013, si bien los años que experimentaron mayores incrementos en la

superficie regada fueron 2006 (36% del área proyectada bajo riego), 2007 (76%) y 2008 (90%). Entre 2009 y 2013 se alcanzó el 100% de la transformación.

La proporción de la cuenca que se decidió transformar viene condicionada principalmente por los materiales geológicos presentes en la misma (Fig. 1), correspondiéndose principalmente con materiales cuaternarios (gravas de matriz limosa) en los que se desarrollan suelos con baja pendiente y salinidad. En contraposición, la zona no transformada se sitúa sobre materiales terciarios (margas, arcillas, calizas margosas y yesos) en los que se desarrollan suelos con alta salinidad y pendiente.

Los principales cultivos presentes antes de la transformación eran el trigo y la cebada, sembrados en invierno y cosechados en junio o julio, y cuya producción dependía de las condiciones meteorológicas, con buenas cosechas en años húmedos. Entre los años 2003 y 2005 se produjo una interrupción en el cultivo de la tierra mientras tenían lugar los trabajos para la transformación al regadío (redistribución de las parcelas, construcción de caminos de acceso, instalación de la red principal de balsas y tuberías, etc.). Durante el periodo en regadío, el maíz se convirtió en el principal cultivo (44% de la superficie), seguido por el cereal de invierno (19%), el girasol y el guisante (9% cada uno) y el tomate (6%). Se trata de regadíos presurizados, con la aspersión como principal sistema (93%), y riego por goteo en el resto de la superficie, principalmente aplicado a hortícolas y frutales minoritarios (almendros).



**Figura 1.** Zona de estudio con representación de la geología simplificada, canal y balsas de riego, parcelas regables, cuenca y barranco de Lerma, y red de piezómetros.

### 3- Metodología

La metodología de este trabajo consistió en la estimación de los diferentes componentes del balance hídrico, la obtención de indicadores de calidad del riego a partir de

éstos, la estimación de las masas exportadas de contaminantes y la obtención de índices de contaminación por sales y por nitratos durante los años hidrológicos 2004-2013 (desde octubre de 2003 hasta septiembre de 2013). La metodología extendida está disponible en Causapé (2009), si bien aquí se presenta una síntesis de la misma.

### 3.1- Balances hídricos

A partir de datos meteorológicos obtenidos en fuentes oficiales (Red SIAR, Oficina del Regante del Gobierno de Aragón), de los datos de riego proporcionados por la comunidad de regantes y de una estimación de la capacidad de retención de agua disponible para las plantas (CRAD), se realizaron balances hídricos diarios en el suelo para cada una de las 55 parcelas agrícolas de regadío ubicadas en la zona de estudio, siguiendo la siguiente ecuación:

$$(P + R) - (ET_R + D_{BAS} + PEA) = \Delta S$$

donde la diferencia entre las entradas (precipitación, P; riego, R) y las salidas (evapotranspiración real,  $ET_R$ ; drenaje del balance de agua del suelo,  $D_{BAS}$ ; pérdidas por evaporación y arrastre de la aspersión, PEA) se corresponde con la variación en el almacenamiento en el suelo ( $\Delta S$ ).

Con posterioridad, se realizó el balance hídrico para el conjunto de la superficie regable de la cuenca, mediante la siguiente ecuación:

$$(P + R + FHE) - (ET_R + BL + PEA) - (\Delta S + \Delta A) = \text{Error del balance}$$

donde la diferencia entre las entradas (precipitación, P; riego, R; flujos hídricos entrantes generados en la zona no regable, FHE), las salidas (evapotranspiración real,  $ET_R$ ; flujo saliente por el barranco de Lerma, BL; pérdidas por evaporación y arrastre de la aspersión, PEA) y el almacenamiento (en el suelo,  $\Delta S$ ; en el acuífero,  $\Delta A$ ) se corresponde con el error del balance. En este tipo de estudios, errores del balance inferiores al 10% son considerados satisfactorios.

### 3.2- Calidad del riego

Una vez obtenido un balance de agua satisfactorio, se usaron los componentes del balance de agua en el suelo para obtener varios índices de calidad de riego (Causapé, 2009): eficiencia de riego (ER), fracción de drenaje del riego (FDR) y déficit hídrico (DH).

$$ER = 100[1 - ((D_R + PEA)/R)]$$
$$FDR = 100(D_R/R)$$
$$DH = 100[(ET_C - ET_R)/ET_C]$$

donde:  $D_R$  es el drenaje de agua de riego; PEA son las pérdidas por evaporación y arrastre del riego por aspersión; R es el volumen de riego aplicado; y  $ET_C$  y  $ET_R$  son la evapotranspiración potencial y real respectivamente. La eficiencia de riego cuantifica el porcentaje de agua de riego que ha sido utilizado bien para satisfacer las necesidades de los cultivos o para aumentar el almacenamiento de agua en el suelo, esto es, que no se ha perdido como drenaje o evaporación y arrastre en el riego por aspersión. La fracción de drenaje del riego cuantifica el porcentaje de riego perdido como drenaje y está determinado por la cantidad de riego aplicado y el contenido de agua en el suelo cuando ocurre el evento de riego. Por último, el déficit hídrico evalúa en que medida las requerimientos hídricos del cultivo no han sido cubiertos.

### 3.3- Balance de sales y cuantificación del nitrato exportado

Se realizaron mediciones o estimaciones del contenido de sales y nitratos en cada uno de los componentes del balance hídrico. En particular, se realizaron muestreos de agua de precipitación, riego y los flujos hídricos entrantes de la zona no regable a lo largo del periodo de estudio. Del mismo modo, se estimó el contenido en sales y nitratos del acuífero mediante una red de piezómetros disponible (Fig. 1). Las salidas de sales o nitratos por evapotranspiración o por pérdidas por evaporación y arrastre del riego por aspersión se consideraron nulas, ya que las concentraciones de sales y nitratos en estos componentes son despreciables. La concentración en las aguas de salida por el barranco de Lerma se estimó mediante una combinación de muestreos y de equipos de medida en tiempo real. A partir de las concentraciones y los volúmenes de cada componente (estimados en los balances hídricos) se obtuvieron los flujos de sales y nitratos.

En el caso del balance de sales, la diferencia entre entradas (precipitación, riego, flujos entrantes de la zona no regable), salidas (barranco de Lerma) y almacenamiento en el acuífero se corresponde con el resultado final del conjunto de procesos de disolución-precipitación. En el caso del nitrógeno, el objetivo no consistió en obtener un balance completo, sino cuantificar la masa exportada y la proporción de ésta que proviene de la precipitación, el riego y los flujos entrantes de la zona no regable. La diferencia entre la masa exportada y la cantidad procedente de riego, precipitación y zona no regable se corresponde con el resultado final del resto de procesos que afectan al balance de nitrógeno (fertilización, fijación, asimilación por las plantas, denitrificación, etc.).

En ambos casos, el resultado final de este apartado es la masa de sales o nitratos exportada por la zona regable de la cuenca de Lerma.

### 3.4- Índices de contaminación

Por último, dos índices propuestos por Causapé (2009) se obtuvieron para analizar en profundidad y poder comparar el impacto agro-ambiental producido: el índice de contaminación por sales (ICS) y el índice de contaminación por nitratos (ICN).

$$ICS = D_S / CE_{NR}$$

$$ICN = D_N / NF$$

donde  $D_S$  ( $t \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ) y  $D_N$  ( $kg \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ) son las masas exportadas de sales y nitrógeno en forma de nitrato, respectivamente.  $CE_{NR}$  ( $dS \text{ m}^{-1}$ ) es la conductividad eléctrica del agua en el periodo sin riego, que sirve como indicador de la salinidad natural del sistema.  $NF$  ( $kg \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ) representa las necesidades de fertilización de los cultivos presentes en la zona a evaluar.

De esta forma, las masas de contaminantes exportadas son corregidas por las condiciones naturales o sociales del sistema a evaluar, lo que posibilita una mejor comparación entre casos de estudio concretos. Regadíos que presentan valores de ICS menores de 2,0 [ $t \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ]/[ $dS \text{ m}^{-1}$ ] y de ICN menores de 0,2 se consideran entre los más sostenibles en lo que respecta a su lixiviado de sales y nitratos (Causapé, 2009).



## 4- Resultados y discusión

### 4.1- Balances hídricos

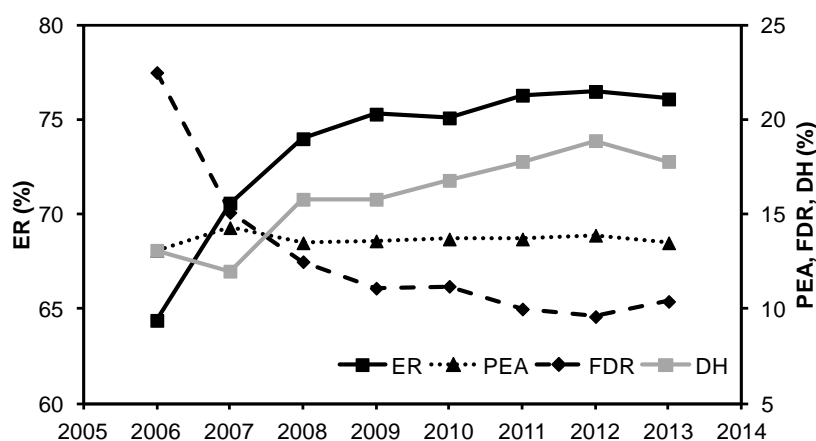
Con la transformación, el riego se convirtió en la principal entrada de agua en la cuenca (60% aproximadamente), sobrepasando los valores de precipitación en el cuarto año del estudio (2007). La evapotranspiración supuso la principal salida (73%), seguida por las salidas a través del barranco de Lerma (22%). Las pérdidas por evaporación y arrastre de la aspersion, si bien suponen un 5% de las salidas para todo el periodo de estudio, supusieron un 13,5% del agua de riego aplicada.

Los balances hídricos presentaron buenos resultados, con desbalances inferiores al 10% para la mayor parte de los años, y un desbalance del 1,2% para todo el periodo de estudio, lo que se considera como satisfactorio y permite utilizar los datos obtenidos para evaluar la calidad del riego.

### 4.2- Calidad del riego

La eficiencia de riego alcanzó el 76,1%, valores similares a los que se obtienen en otros estudios en regadíos presurizados del valle medio del Ebro. Las pérdidas de eficiencia se debieron a la evaporación y arrastre del riego por aspersion (13,5%) y al drenaje (10,4%). Se estimó un déficit hídrico del 17,8%. Cabe destacar la ausencia de pérdidas por evaporación y arrastre en el riego por goteo, lo que pone de manifiesto la mayor eficiencia que este sistema de riego puede alcanzar.

Durante el periodo de estudio, la eficiencia de riego aumentó (1,05% año<sup>-1</sup>) y la fracción de drenaje disminuyó (0,95% año<sup>-1</sup>). Sin embargo, no se garantizó un incremento en la calidad del riego ya que el déficit hídrico también se incrementó (0,95% año<sup>-1</sup>), lo que sugiere que aún existe margen de mejora en la gestión del riego (Fig. 2).



**Figura 2.** Evolución de la eficiencia de riego (ER), pérdidas por evaporación y arrastre del riego por aspersion (PEA), fracción de drenaje del riego (FDR) y déficit hídrico (DH) durante el periodo en riego. Valores acumulados.

Por cultivos, el cereal de invierno y el girasol presentaron los mayores déficit hídricos (por encima del 20%), como consecuencia de unas dotaciones de riego inferiores a las necesidades hídricas de estos cultivos, lo que probablemente haya afectado a su



productividad. En el caso del maíz y del tomate, pese a tener dotaciones por encima de las necesidades hídricas, presentan déficits hídricos del 11% y 16% respectivamente, lo que sugiere un inadecuado calendario en lo que respecta a la aplicación del riego.

Con los datos expuestos, se concluye que para obtener un uso del agua óptimo y una mayor calidad en el riego se precisa de un adecuado diseño de calendarios de riego, esto es, que se ajusten de la mejor forma posible a las necesidades de los cultivos. Así mismo, el aumento de la proporción de riego por goteo o tener en cuenta factores como la humedad del suelo y la velocidad del viento es importante por su relevancia en la fracción de drenaje y en las pérdidas por evaporación y arrastre del riego por aspersión.

#### *4.3- Sales y nitrato exportado por la zona regable*

En lo relativo al lixiviado de sales, en condiciones de secano la zona de estudio exportó una media de  $1,89 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ . Estos valores son inferiores a los que se constatan en otras zonas en secano de similar pluviometría pero mayor salinidad natural en el oeste de Australia (Salama et al., 1993). Tras la transformación al regadío, el lixiviado de sales se incrementó hasta valores medios de  $3,51 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , valores en la parte inferior del amplio espectro de lixiviado de sales desde zonas regadas que aparece en la literatura (e.g., Duncan et al., 2008).

Por otro lado, el lixiviado de nitratos en secano fue de  $11,4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  de nitrógeno en forma de nitrato, algo inferior a lo que se obtiene en otras zonas en secano de la cuenca del Ebro con mayor pluviometría (Casalí et al., 2010). Estas cantidades se incrementaron hasta  $30,8 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  de nitrógeno en forma de nitrato tras la transformación al regadío, valores de nuevo en la parte inferior del amplio espectro de lixiviado de nitratos en zonas regadas disponible en la literatura (e.g., Quemada et al., 2013).

Las comparaciones entre diversos estudios son difíciles por los distintos condicionantes naturales (salinidad del terreno) o antropogénicos (como el tipo de cultivos predominantes y las tasas de fertilización asociadas). Por ello se hace necesaria una herramienta que permita una mejor comparación teniendo en consideración dichos condicionantes, tal y como se propone con los índices de contaminación por sales y nitrato.

#### *4.4- Índices de contaminación*

Los índices de contaminación por sales y nitratos (ICS y ICN, respectivamente) se triplicaron con la transformación al regadío, alcanzando valores de  $1,2 \text{ [t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}\text{]}/[\text{dS m}^{-1}]$  y  $0,16$ , respectivamente. Estos valores son similares a los que se obtienen para otros regadíos presurizados e inferiores a los que se obtienen para regadíos por inundación en diversos estudios realizados en la cuenca del Ebro (Tabla 1). Sin embargo, merece destacar como mejoras en el manejo del agua de riego en regadíos por inundación produce disminuciones significativas en los índices de contaminación, llevándolos en ocasiones a valores similares a los que se obtienen para regadíos presurizados. De hecho, para los estudios analizados se observa que existe relación entre la eficiencia de riego y el índice de contaminación por sales (Fig. 3). En el caso del índice de contaminación por nitratos, esta relación probablemente está enmascarada por aquellos factores relativos al manejo de la fertilización nitrogenada.

En el caso concreto de la cuenca de Lerma, a pesar de que los valores obtenidos para los índices de contaminación se encuentran dentro del umbral de los regadíos

considerados como más sostenibles ( $ICS < 2,0$  [ $t\ ha^{-1}\ año^{-1}$ ]/[ $dS\ m^{-1}$ ]) y  $ICN < 0,2$ ; Causapé 2009), sería aconsejable mejorar la gestión del riego de forma que se incremente el uso del agua y se disminuya el lixiviado de sales y nitratos.

**Tabla 1.** Eficiencia de riego (ER, %), masa de sales exportada de la zona regada ( $D_s$ ,  $t\ ha^{-1}\ año^{-1}$ ), conductividad eléctrica del punto de control durante el periodo sin riego ( $CE_{NR}$ ,  $dS\ m^{-1}$ ), índice de contaminación por sales (ICS, [ $t\ ha^{-1}\ año^{-1}$ ]/[ $dS\ m^{-1}$ ]), masa de nitrato en forma de nitrógeno exportada de la zona regada ( $D_N$ ,  $kg\ ha^{-1}\ año^{-1}$ ), necesidades de fertilización (NF,  $kg\ ha^{-1}\ año^{-1}$ ) e índice de contaminación por nitratos (ICN, -) para varios distritos de riego en la cuenca del Ebro.

Zona de estudio Distrito de riego	Sistema de riego	Periodo de estudio	Área (ha)	ER	$D_s$	$CE_{NR}$	ICS	$D_N$	NF	ICN
DXIX <sup>a</sup> Bardenas I	inundación (mejorado) <sup>e</sup>	2001	100	56	4,5	1,1	4,3	101	115	0,88
		2005-2008		83	1,3	1,1	1,2	51	76	0,67
La Violada <sup>b</sup> Monegros II	inundación (mejorado)	1996-1998	4k	47	19,8	1,8	10,7	106	242	0,44
		2006-2008		58	10,2	2,0	5,0	22	115	0,19
Lasesa <sup>c</sup> Alto Aragón	presurizado maduro	2010	1,4k	76	0,5	1,5	0,3	49	288	0,17
DIX & DXI <sup>d</sup> Monegros II	presurizado	1997-1999	494	80	-	-	-	18	225	0,08
		1997-1998	470		14,0	8,4	1,7	49	223	0,22
LERMA Bardenas II	presurizado reciente	2009-2013	352	76	4,4	3,5	1,2	41	267	0,16

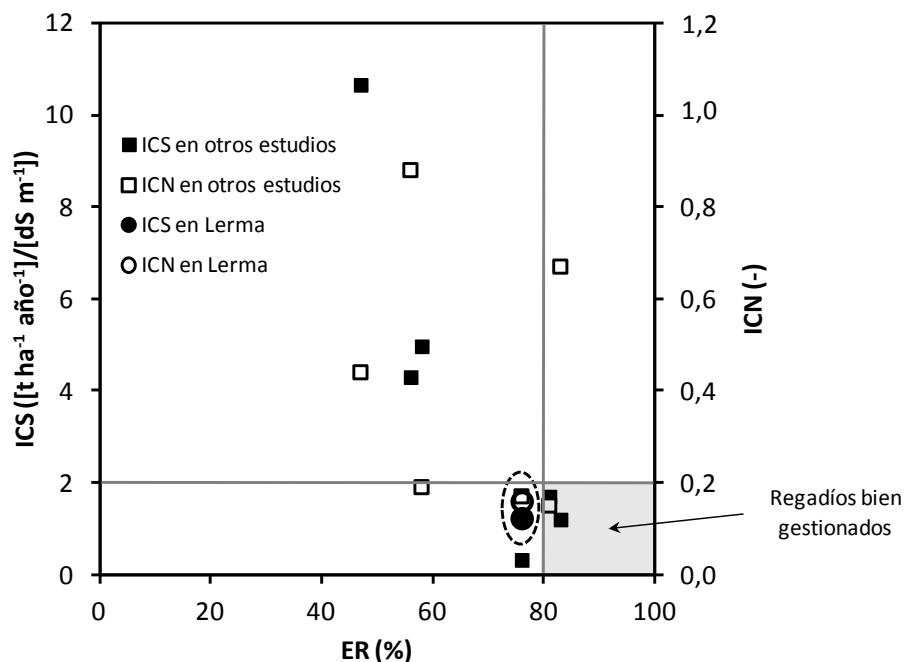
<sup>a</sup> García-Garizábal et al., 2012, 2014.

<sup>b</sup> Barros et al., 2012a, 2012b.

<sup>c</sup> Andrés y Cuchí, 2014.

<sup>d</sup> Tedeschi et al., 2001 (datos de sales), Cavero et al., 2003 (datos de nitratos).

<sup>e</sup> (*mejorado*) implica mejoras en la gestión del regadío (e.g., riego a la demanda en lugar de por turnos).



**Figura 3.** Eficiencia de riego (ER), índice de contaminación por sales (ICS) y por nitratos (ICN) en diversas zonas de estudio en la cuenca del Ebro. Se destaca la zona de los regadíos más sostenibles en lo que respecta al lixiviado de sales y nitratos.

## 5- Conclusiones

La calidad del riego en la cuenca de Lerma es similar a la que se estima para otros regadíos presurizados de la cuenca del Ebro. Pese a que algunos de los indicadores mejoraron durante el periodo de estudio –incrementos en la eficiencia de riego y descensos en la fracción de drenaje–, no se garantiza una mejora en la calidad del riego debido al aumento observado en el déficit hídrico. Esto hace que sea necesario continuar con la mejora del manejo del riego, ajustando la aplicación del agua de riego a las necesidades hídricas de los cultivos y teniendo en consideración factores como la humedad presente en el suelo o la velocidad del viento, de forma que se pueda aumentar la eficiencia y disminuir el drenaje, las pérdidas por evaporación y arrastre de la aspersion, y el déficit hídrico.

Las masas de sales y nitrato exportadas por la zona regable se incrementaron significativamente con la transformación en riego, alcanzando valores similares a los que se obtienen en otros regadíos presurizados. Los índices de contaminación en la cuenca de Lerma, pese a estar por debajo del umbral de lo que se consideran regadíos más sostenibles, son susceptibles de mejorar debido al margen de mejora detectado en el manejo del riego. Medidas complementarias a la optimización del riego como mejorar el manejo de la fertilización o el uso de cultivos cubierta serían de gran utilidad para minimizar el lixiviado de contaminantes en zonas regables.

## Agradecimientos

Este trabajo se ha financiado mediante el proyecto CGL2012-32395 (Ministerio de Economía y Competitividad con participación de fondos Feder – Unión Europea). Así mismo, ha contado con la colaboración de la Comunidad de Regantes nº XI de Bardenas. D. Merchán agradece la financiación a través de la ayuda BES2010-034124 (Ministerio de Economía y Competitividad) e I. García-Garizábal ha contado con financiación a través del programa Prometeo (SENESCYT-Ecuador).

## Bibliografía

- Abrahão, R., Causapé, J., García-Garizábal, I., Merchán, D. (2011a). Implementing irrigation: Water balances and irrigation quality in the Lerma basin (Spain). *Agricultural Water Management*, 102, 97-104.
- Abrahão, R., Causapé, J., García-Garizábal, I., Merchán, D. (2011b). Implementing irrigation: Salt and nitrate exported from the Lerma basin (Spain). *Agricultural Water Management*, 102, 105-112.
- Andrés, R., Cuchí, J.A. (2014). Salt and nitrate exports from the sprinkler-irrigated Malfarás creek watershed (Ebro river valley, Spain) during 2010. *Environmental Earth Science*, 72(7), 2667-2682.
- Barros, R., Isidoro, D., Aragüés, R. (2012a). Three study decades on irrigation performance and salt concentrations and loads in the irrigation return flows of La Violada irrigation district (Spain). *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 151, 44-52.
- Barros, R., Isidoro, D., Aragüés, R. (2012b). Irrigation management, nitrogen fertilization and nitrogen losses in the return flows of La Violada irrigation district (Spain). *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 155, 161-171.



- Casalí, J., Giménez, R., Díez, J., Álvarez-Mozos, J., Del Valle de Lersundi, J., Goñi, M., Campo, M.A., Chahor, Y., Gastesi, R., López, J. (2010). Sediment production and water quality of watersheds with contrasting land use in Navarre (Spain). *Agricultural Water Management*, 97, 1683-1694.
- Causapé, J. (2009). A computer-based program for the assessment of water-induced contamination in irrigated lands. *Environmental Monitoring Assessment*, 158, 307-314.
- Cavero, J., Beltrán, A., Aragües, R. (2003). Nitrate exported in drainage waters of two sprinkler-irrigated watersheds. *Journal of Environmental Quality*, 32(3), 916-926.
- Duncan, R.A., Bethune, M.G., Thayalakumaran, T., Christen, E.W., McMahon, T.A. (2008). Management of salt mobilization in the irrigated landscape – A review of selected irrigation regions. *Journal of Hydrology*, 351, 238-252.
- EPA (Agencia de Protección Medioambiental de Estados Unidos, 1992). *Managing non-point source pollution*. Washington, DC: EPA, Office of Water.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2003a). *Unlocking the Water Potential of Agriculture*. United Nations Food and Agriculture Organization, FAO, Rome, Italy.
- FAO (2003b). *World Agriculture Towards 2015/2030. A FAO Perspective*. United Nations Food and Agriculture Organization, FAO, Rome, Italy.
- García-Garizábal, I., Causapé, J., Abrahão, R. (2012). Nitrate contamination and its relationship with flood irrigation management. *Journal of Hydrology*, 442-443, 15-22.
- García-Garizábal, I., Gimeno, M.J., Auqué, L.F., Causapé, J. (2014). Salinity contamination response to changes in irrigation management. Application of geochemical codes. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 12(2), 376-387.
- Hernández, E.A., Uddameri, V. (2010). Selecting agricultural best management practices for water conservation and quality improvements using Atanassov's Intuitionistic Fuzzy Sets. *Water Resources Management*, 24, 4589-4612.
- Quemada, M., Baranski, M., Nobel-de Lange, M.N.J., Vallejo, A., Cooper, J.M. (2013). Meta-analysis of strategies to control nitrate leaching in irrigated agricultural systems and their effects on crop yield. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 174, 1-10.
- Salama, R.B., Farrington, P., Bartle, G.A., Watson, G.D. (1993). Salinity trends in the wheatbelt of Western Australia: results of water and salt balance studies from Cuballing catchment. *Journal of Hydrology*, 145, 41-63.
- Sutton, M.A., Howard, C.M., Erisman, J.W., Billen, G., Bleeker, A., Grennfelt, P., van Grisven, H., Grizzetti, B. (2011). *The European Nitrogen Assessment: Sources, Effects and Policy Perspectives*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Tedeschi, A., Beltrán, A., Aragües, R. (2001). Irrigation management and hydrosalinity balance in a semi-arid area of the middle Ebro river basin (Spain). *Agricultural Water Management*, 49, 31-50.



## IMPLICACIONES AMBIENTALES Y AGRONÓMICAS DE LA SALINIDAD DE LAS AGUAS SUPERFICIALES Y FREÁTICAS DE LA ZONA ARROCERA DE LA ALBUFERA DE VALENCIA

*Moreno-Ramón, H. (1), Ibáñez-Asensio, S (1), Gisbert Blanquer, J.M.(1)*

<sup>1</sup> Investigador, Centro Valenciano de Estudios del Riego (CVER), Camino de Vera s/n (Valencia) CP: 46022, [sibanez@prv.upv.es](mailto:sibanez@prv.upv.es)

### Resumen

La Albufera de Valencia es un humedal costero cuyo mantenimiento ecológico se encuentra fuertemente condicionado por la gestión del complejo sistema de regadío asociado al cultivo del arroz. Uno de los principales problemas a los que se ha enfrentado el Parque en las últimas décadas es precisamente la calidad del agua y sus implicaciones en la salinidad del suelo, y aunque la zona en su conjunto ha sido objeto de múltiples estudios de momento no se ha realizado un análisis exhaustivo de la influencia de la salinidad de las aguas freáticas y superficiales sobre la calidad del suelo y sus posibles repercusiones en el cultivo. El presente trabajo de investigación pretende caracterizar y evaluar las aguas y los suelos desde el punto de vista espacial y temporal con respecto a la salinidad. Para ello se ha establecido una red de muestreo de aguas y suelos con 133 piezómetros y 54 acequias, disponiéndose de datos mensuales de agua de los últimos 5 años (2010-2015). Como principal resultado se destaca una elevada presencia de sales en las aguas freáticas de la albufera que afecta a la salinidad del suelo. El control de la calidad y altura de las láminas de agua es clave para evitar una degradación del entorno.

### Abstract

The Albufera of Valencia is a coastal wetland which presents problems in terms of water quality and salinization processes. In order to characterize this environment, 133 pits were established for sampling water and soil, and 54 channels were established for sampling water. During five years, these locations have been sampled to characterize and evaluate soil and water resources against salinity. The results showed a salinization process in soil and the influence of water table in the park.

## 1- Introducción

La Albufera de Valencia es un humedal con una dualidad de facetas: la ambiental y la agrícola. En un único espacio, donde se combinan el elevado interés económico, paisajístico y cultural, encontramos 4 ambientes claramente diferenciados: el lago central, el marjal con arroz como cultivo principal (otros cultivos hortícolas ocupan las áreas de mayor cota de manera marginal), las zonas de matas con vegetación natural, y la restinga arenosa ocupada, secuencialmente hacia el mar, por una franja de bosque mediterráneo, las malladas, las dunas y la playa.

Es Parque Natural desde 1986, y “Humedal de importancia Internacional” según la Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional (RAMSAR) por su relevancia como hábitat de aves acuáticas. Además, como “Zona de especial protección de las Aves” (ZEPA), forma parte de la Red Natura 2000 desde 1990 y en 2001 fue seleccionada como “Lugar de Importancia Comunitaria” (LIC). Junto a esta vertiente ambiental, el Parque es a su vez una de las mayores zonas arroceras de España. El cultivo se instauró en la zona a principios del siglo XII, y la superficie arroceras ha ido aumentando desde entonces en detrimento del vaso lagunar de carácter regresivo. Actualmente se cultiva arroz en las 15.500 ha de marjal, donde los cultivares de *Oryza sativa* disfrutan de unas condiciones idóneas para desarrollar su ciclo vegetativo. El flujo continuo de agua necesario es aportado por los ríos Túria y Júcar, y por las dotaciones de agua residual procedentes de diversas plantas depuradoras mediante una extensa red de acequias.

El agua es el recurso más importante del sistema, y de su calidad depende tanto el estado general del Parque como la producción arroceras siendo por tanto uno de los recursos más estudiados desde los años 70. El grado de eutrofización del lago y diversos estudios puntuales asociaron la degradación del ecosistema a la calidad del recurso, poniéndose en marcha múltiples actuaciones: Desde la instalación de plantas depuradoras que mejoraran la calidad de las aguas hasta la reciente construcción de 3 humedales artificiales en las proximidades del lago (Tancat de Pipa, Milia y L'Illa), todo ello con el objetivo de reducir la carga de nutrientes y evitar así el proceso de eutrofización.

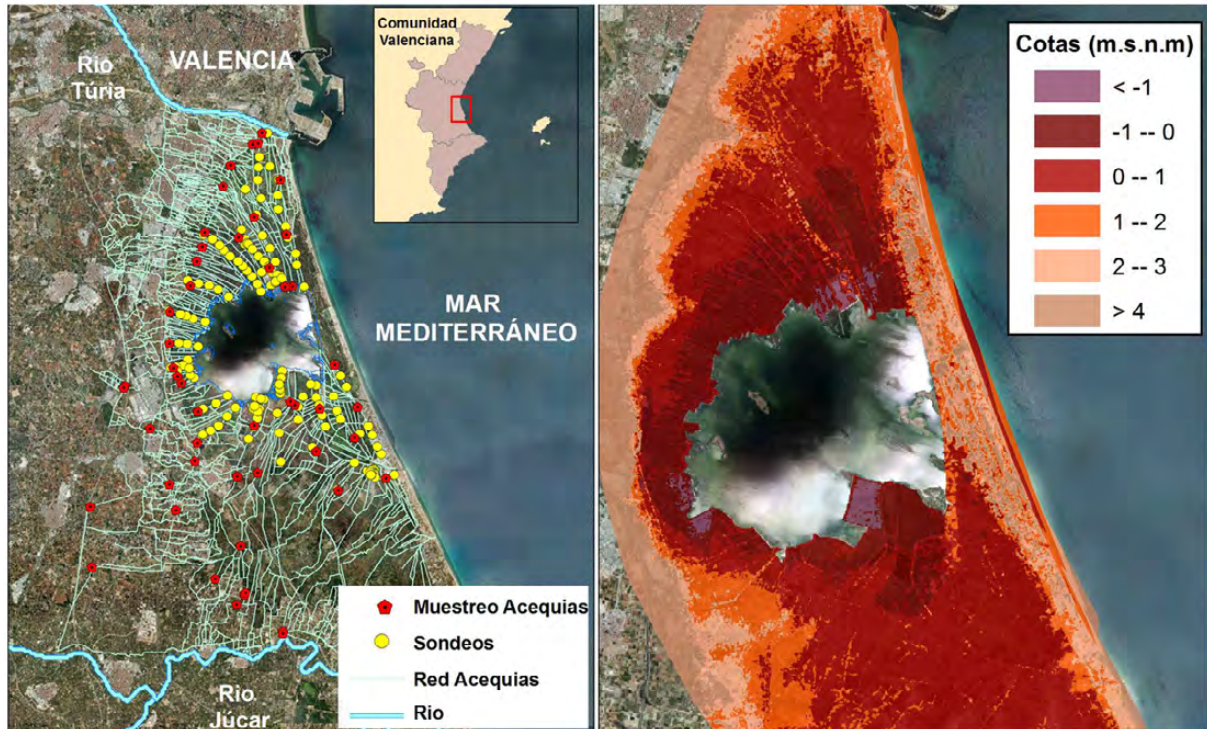
Ante las perspectivas de futuro, que prevén una escasez aún mayor y un empeoramiento en la calidad de las aguas de entrada, y la falta de un estudio integral de los recursos suelo y agua surge el presente trabajo de investigación, que pretende establecer las implicaciones de la variación espacio-temporal de la salinidad de las aguas superficiales (acequias y parcelas de arrozal) y subterráneas (sondeos) sobre la salinización del suelo, así como definir las pautas para su control.

## 2- Materiales y Métodos

La Albufera de Valencia es un humedal localizado 15 km al sur de la ciudad de Valencia (Figura 1) entre los paralelos 39° 19' y 39° 22' de latitud Norte y los meridianos 3° 18' y 3° 22' de longitud Oeste. Ubicada en el interfluvio que conforman los ríos Turia al norte y Júcar al sur, su cuenca hidrográfica queda definida por las estribaciones de las cordilleras Ibérica al norte y Subbética al sur. Geológicamente se caracteriza por ser una zona deprimida sedimentaria encuadrada en la depresión litoral del golfo de Valencia. Los materiales que la cubren son limos pardos arenosos, grises y negros del Cuaternario además de arcillas y arenas. Sus características vienen claramente influenciadas por su origen (marino o fluvial), siendo las zonas altas de la cuenca de aporte de marcada naturaleza calcárea. Topográficamente, exceptuando la *Montañeta dels Sants* (200 m), la

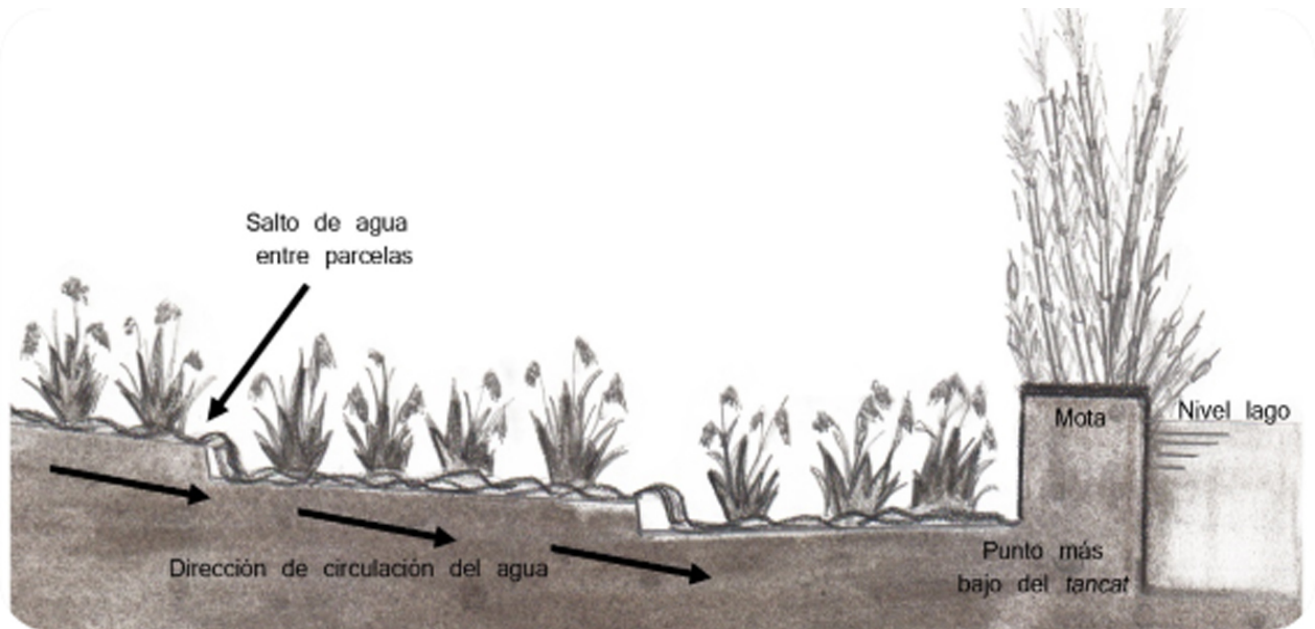


mayoría del área se encuentra a una cota inferior a 4 m (Figura 1), con un valor mínimo de 3.72 metros bajo el nivel del mar.



**Figura 1:** Red de control y muestreo, y mapa de elevación del terreno

La existencia de cotas por debajo del nivel de mar es consecuencia de la construcción durante los inicios del siglo XX de los denominados *tancats*. El *Tancat*, es una unidad hidrológicamente cerrada y completamente independiente compuesta por una sucesión de parcelas de arroz por donde el agua circula de manera continua desde el campo de mayor cota hacia un punto final situado originariamente en el mismo lago central, y por lo tanto a cota inferior al nivel de la lámina del lago (Figura 2). Este punto queda aislado del lago por medio de una mota perimetral que define sus límites. El agua circula de parcela en parcela por gravedad, acumulándose al final del *tancat*, donde se extrae con una bomba y se vierte al lago o a una acequia próxima.



**Figura 2:** Esquema y funcionamiento hidrológico de un *Tanca*

El régimen hídrico de todo el Parque Natural está fuertemente influenciado por el regadío. Desde su introducción en el siglo IX, con la construcción del sistema de acequias del Turia por el Norte y su posterior modificación por el Sur en el siglo XIII (con la construcción del primer tramo de la Acequia Real), se ha definido el régimen hídrico del humedal. Con la ampliación de los riegos de la zona sur y la construcción del segundo tramo de la Acequia Real en el siglo XVIII, además de la expansión del cultivo del arroz se triplicó el uso del agua de riego en la zona. De este modo, entre 1577 y 1761, el regadío aparece como el agente de cambio ambiental en el ecosistema (Sanchis 2007).

El control del riego se lleva a cabo por medio de tres golos. El cierre de las compuertas instaladas en ellas conlleva un aumento del nivel de las aguas en el lago, y es controlado por la Junta Reguladora en función de las necesidades del cultivo. Habitualmente a principios de enero se abren las compuertas para facilitar el vaciado de las parcelas tras el período de inundación invernal. Una vez los campos están libres de la lámina de agua, se comienzan a preparar para el cultivo, siendo éste el momento de menor cota de agua en el lago. A principios de mayo y para la siembra del arroz se vuelven a inundar los campos cerrando las compuertas, manteniéndose el nivel del agua elevado durante todo el ciclo de la planta. Únicamente en junio y julio se producen *els eixugons* o secados del terreno con el objeto de realizar el abonado y el tratamiento fitosanitario. Posteriormente, en septiembre, las compuertas se vuelven a abrir para poder cosechar el arroz, y una vez recolectado, en noviembre, se cierran de nuevo hasta enero, dando lugar a que el lago alcance los máximos niveles de agua. A este proceso se le conoce como la *Perelloná*, y supone el aumento de la superficie ocupada por el lago la cual vuelve a reducirse con la apertura de nuevo de las compuertas en enero. Todo este movimiento de aguas es posible gracias a los excedentes agrícolas de la comarca de l'Horta Sud en la zona norte, y de la Ribera Baixa del Júcar por el sur, siendo básica por tanto la continuidad del uso agrícola para la subsistencia del humedal.

Para la realización del estudio se instalaron 133 piezómetros distribuidos en 17 transectos radiales al lago y 54 puntos de muestreo en acequias, abarcando un área de 6.500 ha (Figura 1). Los piezómetros, tubos de 2 m de policloruro de vinilo de 50 mm de



diámetro nominal, eran totalmente estancos y presentaban contacto con la matriz del suelo a través de 8 perforaciones de 5 mm de diámetro realizadas en su parte inferior, en la que además se instaló una rejilla para evitar la colmatación de la base del tubo por entrada del suelo en el interior (Figura 3).



**Figura 3:** Piezómetros

Aprovechando la instalación de los piezómetros en 2010, se tomaron muestras alteradas del perfil del suelo cada 20 centímetros mediante una barrena de tipo helicoidal. La descripción de los parámetros edáficos se realizó en campo conforme a las directrices de la guía para descripción de perfiles de la FAO (FAO 2009). Posteriormente en 2012 y 2014 se volvieron a tomar muestras de suelos siguiendo las pautas recomendadas por *Sparling et al. (2004)* que establecen re-muestras entre 3- 10 años para el seguimiento de las variaciones de las propiedades del suelo.

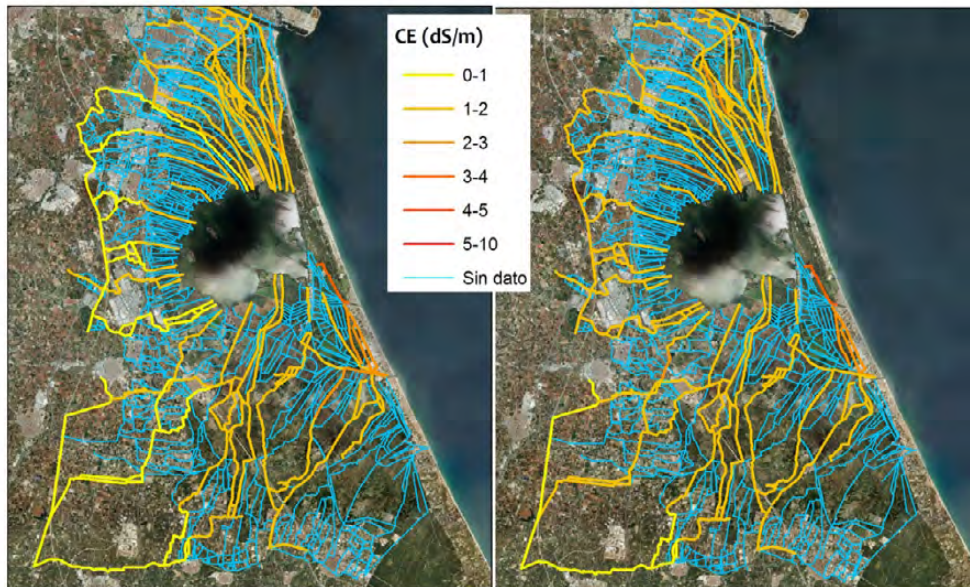
Las analíticas en los suelos fueron conductividad eléctrica del extracto ( $CE_e$ ), conductividad 1/5, pH, textura según Bouyoucos, color, materia orgánica, carbonatos, y cationes y aniones principales, además de la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), según el USDA (*Soil Survey Staff 2004*)

Por lo que respecta a las aguas, durante 5 años se tomaron muestras mensuales del agua freática (sondeos) y superficial (puntos de sondeo y acequias), determinándose su conductividad eléctrica (CE) y pH. En las muestras más significativas se analizó el contenido de calcio, magnesio, sodio, potasio, carbonatos, bicarbonatos, cloruro y sulfatos según la metodología oficial (*APHA et Al. 2005*). Además se registró la altura de la capa freática en el interior de los piezómetros, así como la altura de la lámina libre sobre la superficie del terreno.

Todo los puntos se georreferenciaron mediante el uso de la estación de referencia virtual Leica GPS 1200. Las coordenadas UTM y la cota a nivel centimétrico fueron asignadas a cada punto para su posterior representación cartográfica. Los resultados fueron tratados estadísticamente mediante pruebas no paramétricas con el objetivo de definir la influencia de las diferentes fuentes de riego (ríos, depuradoras, etc.) y observar la evolución espacio temporal de la calidad de las aguas. Además toda la información se plasmó cartográficamente mediante métodos geoestadísticos.

### 3- Resultados y discusión

Las aguas de las acequias ofrecen en general una buena calidad para el cultivo del arroz. Sus valores de CE además fueron inferiores a  $2 \text{ dS m}^{-1}$ , el límite estipulado por Soria et al. (2005) para el mantenimiento de las condiciones óptimas del lago en relación a la salinidad. Concretamente la CE media fue de  $1.74 \text{ dS m}^{-1}$  con un valor máximo de 9.95 y un mínimo de  $0.42 \text{ dS m}^{-1}$ . El 79.8 % de las muestras presentaron una CE inferior a  $2 \text{ dS m}^{-1}$  y destaca una correlación positiva estadísticamente significativa entre ésta y la distancia al lago, pues las acequias de cabecera (más alejadas del lago) presentaron menor salinidad. El comportamiento de las acequias fue bastante homogéneo temporalmente, diferenciándose con claridad dos periodos: el estival, donde encontramos valores más elevados en la zona de la restinga (barrera arenosa que lo separa del mar) y en la zona norte; y el de inundación invernal en el que se produjo un descenso generalizado de los valores de la CE (Figura 4). Los registros máximos fueron de carácter puntual, localizándose siempre en las acequias de desagüe de las aguas del lago hacia el mar. Por lo tanto la salinidad en dichas acequias fue resultado tanto de la calidad del agua del lago como de la de las aguas de retorno de los campos que se encuentran en el camino hacia el mar, de ahí los picos y variaciones en sus valores.



**Figura 4:** Variación espacio-temporal de la CE en acequias en junio 2010 y enero 2012.

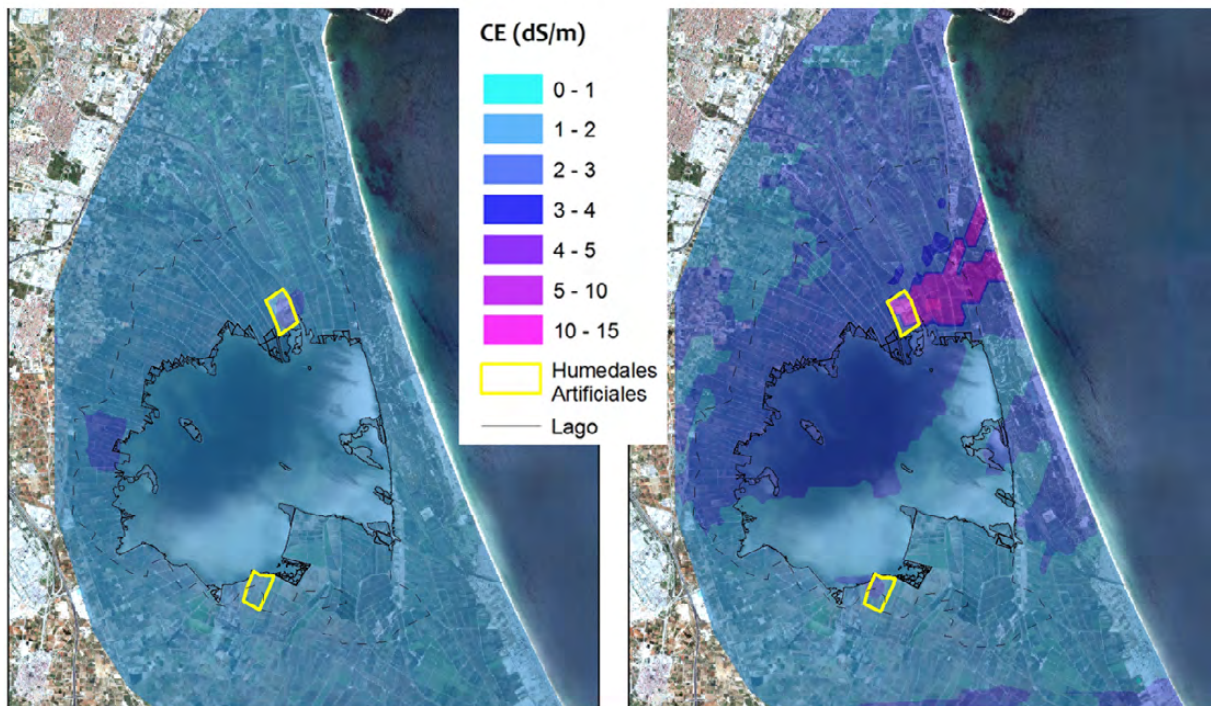
El análisis estadístico de los datos de CE en función de los sectores de riego mostró que los sectores Acequia de Oro y Acequia de Favara en la zona norte del lago alcanzaron un valor medio mayor que el resto. Las aguas de estas dos acequias proceden, respectivamente, de las depuradoras de Pinedo y Quart-Benacher. En contraposición a estos resultados, el sector de la Acequia Real del Júcar fue el que menores valores medios de CE registra, siendo responsable del riego del parque en su zona sur y oeste.

En referencia al muestreo de la lámina libre circulante por los campos de arroz, el valor medio de la CE fue de  $2.34 \text{ dS m}^{-1}$ , con un máximo de  $14.40 \text{ dS m}^{-1}$  y un mínimo de  $0.15 \text{ dS m}^{-1}$ . El arroz es una planta con moderada tolerancia a la salinidad, que puede reducir su rendimiento entre un 10-18% por cada unidad de aumento de la CE a partir de un valor umbral de  $2 \text{ dS m}^{-1}$  (Ayers y Westcot 1987; Qadir et al. 2000). En este sentido cabe destacar que el 52% de las muestras recogidas presentaron una CE superior a  $2 \text{ dS m}^{-1}$ , y un 6.8% del total una CE superior a  $4 \text{ dS m}^{-1}$ . Así pues hay zonas del Parque Natural cuyas



aguas superficiales no son aptas para el riego del arroz puesto que inducen importantes mermas en su rendimiento; teoría que Ballesteros ya expuso en 2007 tras detectar valores medios elevados en el agua de los *tancats*, lo que supone una amenaza para el ecosistema agrícola (Ballesteros 2007). Este problema es ya una realidad y los agricultores, conocedores de la buena calidad del agua del Júcar, desean que ésta llegue para inundar sus campos así como que las dosis se mantengan constantes durante el ciclo. Nuestros datos reflejan una disminución de la CE de las aguas durante el final de la campaña del cultivo del arroz y al inicio del periodo de inundación posterior. Esta tendencia se transloca al inicio del periodo de preparación de los campos en marzo.

Los mayores valores de CE se localizaron en el *Tanecat* de Pipa y en el *tanecat* colindante a éste hacia el este (Figura 5). El *Tanecat* de Pipa, situado al norte del lago, fue construido entre 2007-2009 y es uno de los 3 humedales artificiales de la zona. Éstos, rondaron los  $14 \text{ dS m}^{-1}$  y se alcanzaron en los meses de septiembre cuando los campos son secados para proceder a cosechar el arroz facilitando que se produzcan filtraciones desde la capa freática hacia la escasa lámina libre existente. El aumento de la salinidad del agua superficial fue consecuencia del aporte de sales de la capa freática. En cuanto a la naturaleza de estas agua libres, el 79,8% de las muestras fueron cloruradas, mientras que el 14% presentaron facies sulfatadas y el 5,6% restante facies carbonatadas.



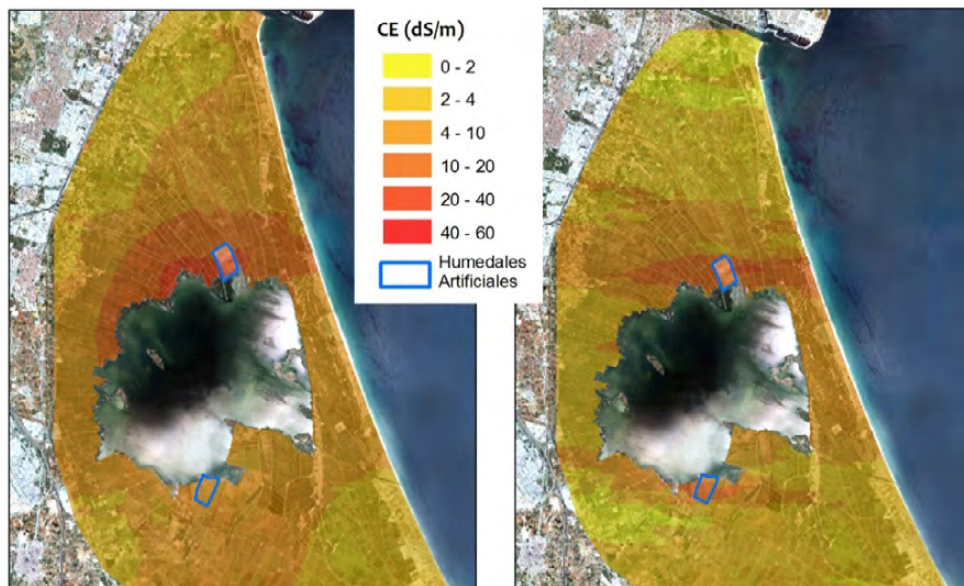
**Figura 5:** Salinidad de la Lámina libre en Marzo de 2011 y Septiembre de 2011.

La correlación bivariada entre las distancia al lago y a la costa con respecto a CE de las aguas de la lámina libre mostró significancia estadística a un nivel de confianza superior al 99%, indicando que a mayor cercanía a la costa y al lago mayores eran los valores de salinidad en las aguas.

En referencia al contenido en sales de la capa freática, destacar que el valor medio de la CE fue de  $6.96 \text{ dS m}^{-1}$ , con un valor máximo de  $46.21 \text{ dS m}^{-1}$  y un mínimo de  $0.29 \text{ dS m}^{-1}$ . En este caso el 76% de las muestras presentaron una CE superior a  $2 \text{ dS m}^{-1}$ , siendo el 42% de las mismas mayores a  $4 \text{ dS m}^{-1}$ . Si analizamos el valor promedio en cada mes para

todo el conjunto de sondeos se observa como hubo una disminución de la CE durante los meses de marzo, abril y noviembre, que es cuando se registraron los mayores valores de precipitación. Los valores promedios de CE en la capa freática fueron mayores durante el ciclo del arroz:  $8,86 \text{ dS m}^{-1}$  durante el cultivo frente a los  $7,25 \text{ dS m}^{-1}$  de los meses de inundación invernal.

Los valores más altos de CE corresponden a los años 2011 y 2012 y se localizan en el tancat de Milia en la zona sur y en los tancats colindantes al lago de la zona norte, siendo el tancat de Pipa el área de mayor salinidad. Los tancats de Milia y Pipa son antiguos arrozales reconvertidos en humedales artificiales para la depuración de los nutrientes de las aguas por lagunaje, y su manejo diferente al resto del arrozal influyó sustancialmente en dichos valores. Además durante su ejecución se alteró la cota inicial del terreno para permitir el flujo natural de las aguas hacia el lago, eliminándose el *topsoil* y volteándose los horizontes del suelo. Las aguas se clasifican como cloruro sódicas y el valor máximo fue registrado en junio de 2011 en el tancat de Pipa (Figura 6).



**Figura 6:** Salinidad de la capa freática en junio de 2011 y marzo de 2012.

En general, el conjunto de aguas (freáticas, lámina libre y acequias) se clasificaron como ligera y moderadamente alcalinas, con un riesgo de sodificación bajo. Únicamente un 5% de las muestras de lámina libre presentaron dicho riesgo. Por el contrario, en el caso de las aguas freáticas, éste porcentaje fue mucho mayor (46%).

En referencia a los suelos, destacar que fueron moderadamente carbonatados (35.5%), con un porcentaje medio de materia orgánica del 4.56 y una textura franco arcillosa, aunque encontramos también texturas más gruesas cerca de la restinga arenosa. Los suelos se clasificaron como Aridisoles y Entisoles (*Soil Survey Staff 2014*), siendo el hidromorfismo y la salinidad sus características más relevantes. El valor medio de la salinidad fue de  $7.56 \text{ dS m}^{-1}$ , con un máximo de  $55.7 \text{ dS m}^{-1}$  y un mínimo de  $1.03 \text{ dS m}^{-1}$ . El 80% de las muestras presentaron carácter salino, siendo el 7% de las mismas fuertemente salinas ( $CE_e > 16 \text{ dS m}^{-1}$ ). El 20% restante tuvo valores inferiores a  $4 \text{ dS m}^{-1}$ , localizándose principalmente en los arrozales situados a cotas más elevadas o en los primeros 20 cm de la superficie del suelo. Especialmente, los mayores valores se observaron en las zonas cercanas al lago y en el área de la restinga. En relación a la distribución de las sales en el



perfil del suelo, el 65% de los puntos muestreados reflejó un aumento claro de la salinidad con la profundidad (Figura 7). En los humedales artificiales construidos para depurar el agua la salinidad en la superficie del suelo registró los máximos valores, aunque en la representación cartográfica no es apreciable debido a la escala. Como hemos indicado en el párrafo anterior, al eliminarse los horizontes superficiales del suelo durante su proceso de construcción, horizontes más profundos y salinizados quedaron en superficie.

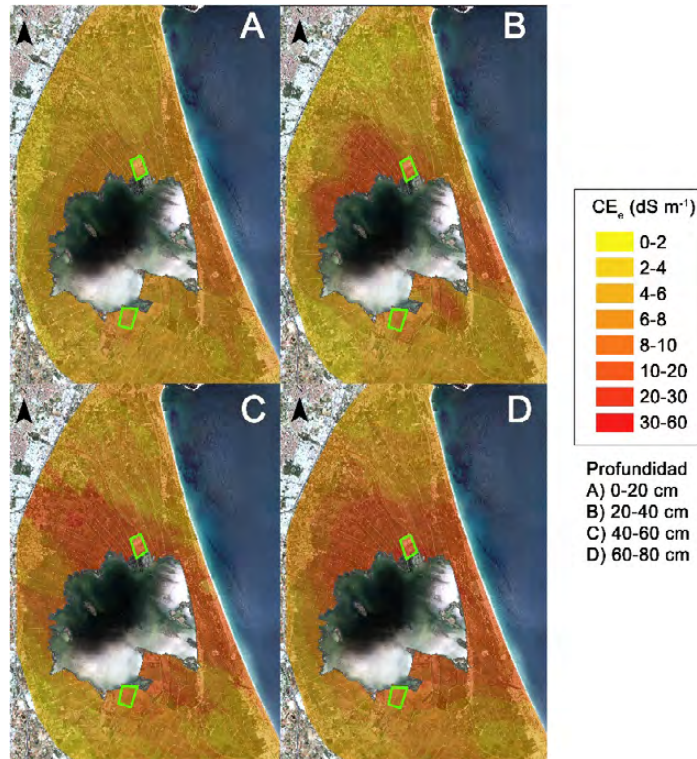


Figura 7: Mapas de la salinidad en suelos a distintas profundidades.

La clasificación de los suelos (tabla 1) en función de la  $CE_e$  y la Relación de Adsorción de Sodio (RAS) indica que el 80% de las muestras fueron salinas o salino-sódicas, siendo normales únicamente el 20% restante. En coincidencia con la distribución en el perfil del suelo de la  $CE_e$ , el valor del RAS también aumentó en profundidad.

Tabla 1: Clasificación de los suelos en función de  $CE_e$  y RAS.

	$CE_e < 4 \text{ dS m}^{-1}$	$CE_e > 4 \text{ dS m}^{-1}$
<b>RAS &lt; 13</b>	Normal: 20%	Salinos: 52,7%
<b>RAS &gt; 13</b>	Sódicos: 0%	Salino-sódicos: 27%

Finalmente, el análisis de la evolución temporal de las sales retenidas en la matriz del suelo reflejó que el 53.3 % de las muestras recogidas en 2014 presentaron valores de  $CE_{1/5}$  inferiores a los iniciales, mientras que en el 46,7% restante fueron superiores. Al agrupar los datos según la profundidad del muestreo se observó que el 35.5% de los suelos presentaron mayores valores de  $CE_{1/5}$  en superficie, pero a profundidades 20-40 cm, 40-60 cm y 60-80 cm, el porcentaje de suelos que son más salinos respecto a 2010 es del 46%, 53% y 58% respectivamente. Además, si consideramos la cota y analizamos por separado las zonas altas de las bajas, el número de puntos salinizados aumenta en las proximidades al lago. En todo el proceso la influencia de la capa freática es determinante, sustentando la idea de que el flujo subsuperficial procedente del mar mediterráneo es el causante de la salinización del suelo.



#### 4- Conclusiones y recomendaciones

La calidad de las aguas en acequias y lámina libre en relación a la salinidad es aceptable para el cultivo del arroz con valores de CE media-alta, y en general presentan cloruro-sódicas.

Las aguas freáticas presentan valores de CE altos, siendo la capa freática el principal agente causante de la salinización del suelo. Se constata la existencia de intrusión marina puesto que los máximos valores de CE de estas aguas se asemejan a la CE del agua del mar en el Mediterráneo. En general presentan facies cloruro sódicas con un contenido bajo en sodio, y mayores valores de salinidad durante el ciclo de cultivo, en las proximidades al lago y en los puntos de menor cota.

En cuanto a los suelos, las mayores CE<sub>e</sub> se registraron en la zona norte y en los humedales artificiales recientemente construidos. Se ha constatado un mayor contenido en sales en los horizontes más profundos que en el *topsoil*, los cuales además han acumulado sales a lo largo del tiempo.

En conclusión, la combinación y posterior modelización de datos (valores de CE de la capa freática y de la lámina libre con alturas piezométricas) permitirá en un futuro el control del riesgo potencial de salinización del Parque Natural que ha de ser monitorizado para evitar la degradación del entorno. Así mismo, debido a la gran variabilidad de manejos que se producen en la Albufera de Valencia se estima necesario llevar a cabo un estudio pormenorizado de cada uno de los *tancats* ya que existe un riesgo muy alto de que las sales de la capa freática asciendan y salinicen la parte superficial del suelo, imposibilitando de este modo el cultivo del arroz. Además sería interesante hacer un estudio de la evolución de plantas halófitas en las zonas con mayor salinidad, para estimar el grado de desplazamiento de la vegetación natural autóctona por especies más tolerantes a la salinidad de aguas o suelos.

#### 5- Bibliografía

- APHA. (2005). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21st edition. Clesceri, L.S.; Greenberg; A.E.; Eaton, A.D.; Rice E.W., eds. Washington. USA.
- Ayers, R.S. Westcot, D.W. (1987). La calidad del agua en la agricultura. Estudios de Riego y Drenaje nº 29 –Rev. 1. FAO. Roma. Italia..
- Ballesteros, L. (2007). Implantación de redes de control en el Parque Natural de l'Albufera (Valencia) Universitat Politècnica de Valencia. pp. 194.
- FAO. (2009). Guía para la descripción de perfiles, 4th ed. FAO. Rome. Italia.
- Sanchis, C. (2007). L'Albufera de Valencia: Sistema natural y producto humano. En: Arroz en el Parque Natural de l'Albufera: Un futuro sostenible Encuentro Ecorice. (pp. 10-29). Grupo ECORICE. Valencia.
- Quadir, M. Ghafoor, A. Murtaza, G. (2000). Amelioration strategies for saline soils: A review. Land degradation & Development. 11: 501-521.
- Soil Survey Staff. (2009). Soil Survey Field and Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigations Report No. 51, Version 1.0. Burt, R., eds. U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. Washington. USA.
- Soil Survey Staff. (2014). Keys to Soil Taxonomy, 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.



- Soria, J.M. Sahuquillo, M. Miracle, R. (2005). Relaciones entre las aportaciones a la zona regable del río Júcar y la conductividad de la Albufera de Valencia. *Limnetica*, 24: 155-160
- Sparling, G.P. Schipper, L.A. Bettjeman, W. Hill, R. (2004). Soil quality monitoring in New Zealand: practical lessons from a 6-year trial. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 104: 523–534.

## MODELIZACIÓN DE ACUÍFEROS PARA GARANTIZAR LOS RECURSOS EN EXPLOTACIONES CON DESTINO A RIEGO

*Martínez Arias, Alfredo<sup>1</sup>, Soto Venegas, José Manuel<sup>1</sup>, Beltrán Medina, Pedro.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> WATER TECHNOLOGIES. WTECH, S.L. C/Central 13, Torre Godoy 30100, Murcia

<sup>2</sup> CENTRO DE INVESTIGACION .ACUMA. (ACUICULTURA Y MEDIO AMBIENTE).  
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALENCIA. Camino de Vera s/n. 46022. Valencia

### Resumen

Los modelos hidrogeológicos constituyen una herramienta básica de apoyo a las decisiones para la gestión de recursos hídricos y se utilizan para contabilizar las entradas y salidas de recursos hídricos en el espacio y en el tiempo, simulando la disponibilidad futura de recursos y por tanto la garantía en cantidad y calidad de los mismos. En este contexto, un modelo hidrogeológico, bien construido y calibrado, tiene la virtud de poder predecir el futuro de distintos escenarios posibles y por tanto poder actuar con suficiente antelación frente a situaciones críticas o de estrés prolongado. Por ejemplo, ante un periodo de estiaje prolongado (sequía) la posible entrada en explotación de nuevos pozos de bombeo o regeneración de los existentes, cómo afectaría al sistema hidrogeológico, ¿lo agotaría?, ¿en cuánto tiempo?, ¿aguantaría la explotación hasta el siguiente periodo húmedo?, ¿afectaría a la calidad del agua?, etc. Existen muchas cuestiones fundamentales que resuelve la modelización y que hasta ahora, únicamente la Administración, ha estado utilizando como herramienta fundamental para la gestión de la explotación de acuíferos.

### 1) INTRODUCCIÓN

Lo que se pretende en este artículo es proponer la modelización hidrogeológica como herramienta de gestión amable y cercana, al alcance de cualquier usuario que gestione recursos hídricos subterráneos, vital para la supervivencia de las Comunidades de regantes o Asociaciones de Usuarios que dependan en su mayor parte del recurso subterráneo.

Con dicha herramienta, aplicada a la agricultura, se podrá observar la sostenibilidad del acuífero o acuíferos en el tiempo, esto es la vida útil de la explotación en condiciones favorables. Los elementos a incorporar en situaciones excepcionales (sequías, afecciones de otras explotaciones, contaminaciones, etc...) y por tanto el coste y amortización de los mismos. Efectuar prognosis de evolución de la demanda futura y su viabilidad tanto en garantía de cantidad y calidad de recurso como económica y financiera de la Sociedad que se trate. En resumen, una herramienta que optimice la toma de decisiones con el objetivo de minimizar costes y garantizar la sostenibilidad de la explotación en el futuro.

Se presentará un ejemplo real de aplicación durante el último periodo de sequía 2005 – 2008 en la Vega media de la Cuenca del Segura, donde se utilizó esta herramienta para garantizar el riego en dicho periodo, explotando el acuífero de forma secuencial y sectorizada con objeto de no provocar afecciones en el periodo seco, recuperando su estado natural en el periodo húmedo subsiguiente.

### 2) MODELIZACIÓN DE ACUÍFEROS AFECTANTES



Se llevará a cabo la modelización hidrogeológica del acuífero o acuíferos afectantes a la Comunidad de regantes o usuarios de que se trate. Dicho modelo servirá como herramienta de gestión, fundamental en situaciones de escasez de recursos, con objeto de no provocar afecciones indeseables al acuífero, con la consiguiente depresión del nivel dinámico, que repercute en un incremento considerable de los costes de mantenimiento y conservación de la Comunidad de regantes. Esta herramienta simulará “a priori” los diferentes escenarios de explotación, en función de las necesidades. Al término del contrato, una vez terminada la calibración del sistema, la Comunidad de Regantes, contará con una herramienta de decisión más avanzada para la explotación de los acuíferos afectados por misma. Water Technologies cuenta, dentro de su equipo, con uno de los principales expertos en modelización hidrogeológica, apoyado por personal experto en realización y calibración de modelos hidrogeológicos.

Toda la información proveniente de la perforación, instalación y desarrollo de las captaciones, genera una gran cantidad de datos sobre los materiales que conforman el acuífero: litologías, potencias, transmisividades, permeabilidades, caudales, etc.

Toda esta información se encuentra dispersa y desorganizada, por lo que se impone la realización de un modelo que integre todos los datos existentes mediante la utilización de software especializado.

Mediante la utilización dicho software, se puede organizar, clasificar, gestionar y manipular la información existente sobre cualquier acuífero.

El software propuesto consta de 2 fases.

Correlación de sondeos. Discretización espacial en 3D de parámetros hidrodinámicos  
Modelización hidrogeológica e hidrogeoquímica.

## 2.1) CORRELACIÓN DE SONDEOS. DISCRETIZACIÓN ESPACIAL EN 3D.

Dada la variedad de fuentes de datos hidrogeológicos y para el tratamiento de forma eficaz de los mismos, es necesaria la integración de los mismos en un software que permita, no solo el almacenamiento y tratamiento, sino también, la salida de los mismos a través de una interfaz ágil y sencilla en formatos aplicables a la hidrogeología, que permita una gestión y manejo adecuado. Para ello se propone la utilización de la aplicación denominada Hydro GeoAnalyst, que permite:

- Almacenaje de capas múltiples de información por ejemplo datos litológicos, datos geofísicos, niveles del agua, y datos de la calidad del agua.
- Salida de datos en una variedad de formatos.
- Una interfaz fácil y sencilla de utilizar.

Este software posee una GIS integrado, que permite el tratamiento de los datos insertados de forma georeferenciada, lo que facilita la gestión adecuada de los mismos.

Posee también, una herramienta para el diseño de perfiles geológicos e hidrogeológicos, tanto en 2, como en 3 dimensiones, lo que permite crear modelos tridimensionales del terreno en base a los datos de sondeos georeferenciados.

El 3D-Explorer es una herramienta para visualizar diagramas, localizaciones de sondeos con litología, mapas, contornos, y flujo de plumas dentro del mismo ambiente 3D.



## 2.2) MODELIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA.

Como base para la modelización matemática, en primer término se establecerá un modelo conceptual basado en el balance hídrico, entendido como un resultado de la aplicación del principio de continuidad de masas (ley de continuidad) a un volumen de niveles permeables, definida por condiciones de contorno previamente establecidas (acuífero). Para este sistema y durante un periodo de tiempo concreto, la diferencia entre el total de entradas y el total de salidas debe ser igual a la variación del agua almacenada.

La cuantificación de las entradas y salidas en los acuíferos se realizará evaluando caudales (de aportaciones, de bombeos, de transferencias subterráneas, etc.), mientras que las variaciones de almacenamiento se establecerán por las oscilaciones del nivel piezométrico. Para ello se establecen 5 puntos básicos objeto de recopilación, análisis y depuración, para la confección del modelo matemático que más adelante se desarrollarán brevemente.

1. Estudio climatológico e hidráulico de la zona delimitada en las presentes Unidades Hidrogeológicas y sus áreas de influencia, orientado a la asignación de una serie concreta de precipitaciones a cada acuífero, para posteriormente aplicarla al modelo de simulación del sistema.

Se utilizarán las series de precipitaciones y temperaturas completadas y restituidas del Pan Hidrológico, que se actualizarán al año en curso, de la red de estaciones meteorológicas de la zona de trabajo y de un perímetro amplio en su entorno, incluyendo pluviómetros totalizadores ubicados en cotas altas, no cubiertas por estaciones meteorológicas.

Con los datos generados se procederá al trazado de isolíneas de precipitaciones, temperaturas, ETP, ETR y lluvia útil, etc. Previamente se establecerán las relaciones cota / precipitación-temperatura y precipitación / exposición de vertientes a dirección de frentes de lluvia, con el fin de tener en cuenta el factor topográfico al trazado de tales líneas.

Por último se calcularán los volúmenes correspondientes a precipitación y lluvia útil para cada acuífero.

2. Definición de las condiciones en los límites, que pueden ser cerrados cuando se tratan de rocas confinantes de tipo impermeable, o abiertos, cuando el límite del acuífero es otro conjunto con el que se puede establecer transferencia hidráulica subterránea.

Estas condiciones vendrán dadas por la geología y geometría de los conjuntos permeables y pueden ser evaluadas a partir de su piezometría y gradientes hídricos. Para ello se confeccionarán los correspondientes planos piezométricos de cada acuífero, con las medidas de niveles que se efectúen a lo largo de las fases de toma de datos durante la vigilancia y control de los acuíferos.

En caso de disponer de evolución piezométrica en varios puntos del acuífero, se confeccionarían planos para diferentes fechas, de donde se podrá establecer las posibles variaciones en el comportamiento de los límites abiertos en el tiempo (en procesos de sobreexplotación es frecuente que los límites abiertos cambien de comportamiento por debajo de cierta cota).

Cuando las condiciones de límites afecten o estén relacionados con otras UH o acuíferos adyacentes, los parámetros en los bordes deben ser establecidos y consensuados, con el

beneplácito y aprobación de las Comunidades adyacentes o con el Organismo de Cuenca de que se trate.

3. Estudio de la relación con cauces superficiales o masas de agua, que pueden ser cedentes de caudal, (alimentan al conjunto permeable) o receptores de salidas subterráneas.

En el primer caso se considerará el régimen de aportaciones de los cursos temporales de agua que discurren sobre las superficies permeables y se evaluará las pérdidas de caudal que puedan experimentar, bien por percolación directa, bien por las derivaciones de retornos de riego que se realizan para su aplicación en terrenos de regadío situados sobre el acuífero.

En los casos de verificarse el drenaje de recursos subterráneos hacia cauces o subálveos, se evaluarán los caudales circulantes por medidas directas y cálculo de Darcy, respectivamente.

4. Cuantificación de salidas por manantiales, drenajes, transferencias laterales y bombes, para lo que se utilizarán las series foronómicas que puedan existir y los datos de bombes obtenidos de la base de datos creada a tal efecto.

En los casos de falta de históricos de bombeo, se recurrirá a la estimación de forma indirecta a través de los consumos energéticos y de los ratios kWh/m<sup>3</sup> y Wh/m<sup>3</sup>/m.

5. Definición de las variaciones de reserva, calculadas de forma empírica a partir del coeficiente de almacenamiento (S), o de forma experimental a partir de los volúmenes aportados por el acuífero por cada metro de depresión del nivel de agua en años se escasa o nula alimentación.

Se tomarán los datos puntuales de coeficiente de almacenamiento de los ensayos de bombeo realizados en los puntos ensayados con anterioridad, extrapolar los valores al entorno circundante de similares características hidrogeológicas. Se efectuarán reinterpretaciones de los ensayos de bombeo anteriormente efectuados.

Puesto que el coeficiente de almacenamiento puede sufrir variaciones espaciales, e incluso temporales (compactación por drenaje), lo normal es que las variaciones de reserva se establezcan a través de las oscilaciones del nivel piezométrico, para lo cual es imprescindible la disposición de series piezométricas para todos y cada uno de los acuíferos que conforman las UH tratadas.

A partir de la definición de los cinco puntos anteriores para cada acuífero, se procederá un modelo matemático. El período de simulación y los intervalos de tiempo se determinarán según las características de la información obtenida (período y cadencia de los datos). La calibración de los modelos tiene por objeto verificar la coherencia de los datos, cuantificar el balance hidráulico y determinar las magnitudes de las variables no cuantificadas y en particular la alimentación y su distribución espacial.

La simulación de alternativas tendrá por finalidad analizar la respuesta de los acuíferos a las solicitudes de los volúmenes susceptibles de bombearse con criterios de sostenibilidad, entendidos como condiciones de estabilidad de los niveles de agua en acuíferos sobreexplotados y/o de limitación del avance de la interfase salina en acuíferos costeros o con influencia salina.

Conocidos la magnitud de tales volúmenes y la bondad de su explotación, se podrán calcular los déficits estructurales existentes en los aprovechamientos que dependen de cada acuífero



y, por consiguiente, los volúmenes de agua procedentes de fuentes externas que se deberían destinar para equilibrarlos.

Para la modelización del funcionamiento hidráulico se propone utilizar el programa Visual MODFLOW, en su versión Pro, paquete integrado de simulación tridimensional del flujo subterráneo y transporte de contaminantes, que incluye las siguientes aplicaciones:

- VISUALMODFLOW, modelo de flujo subterráneo.
- MODPATH, cálculo de vectores, velocidad del flujo y tiempos de tránsito.
- MT3DMS, modelo de transporte de contaminantes con procesos de advección, dispersión y reacciones químicas en acuíferos.
- RT3D, modelo de dispersión y mezcla de contaminantes.
- WinPEST, calibración automática de balances.
- 3D-Explorer, visualización y animación flujos y procesos contaminantes en tres dimensiones.

En todos los acuíferos de las UH consideradas, la calibración de los elementos de sus respectivos balances se efectuará con el módulo WinPEST.

Visual MODFLOW Pro permite simulaciones tanto en régimen permanente como en régimen transitorio. La naturaleza del acuífero puede ser libre, confinado o semiconfinado. El flujo generado puede provenir de bombeos desde puntos externos o internos al modelo, pozos de recarga, recarga superficial, evapotranspiración, etc.

Se pueden definir cada uno de los parámetros que forman el modelo. Las transmisividades hidráulicas pueden definirse para cada capa y diferenciarse espacialmente, pudiéndose ser anisotrópica (restringido ateniendo a las direcciones principales alineadas con la rejilla). El coeficiente del almacenaje puede ser heterogéneo. Además de simular flujo del agua subterránea, MODFLOW puede incorporar capacidades relacionadas, por ejemplo, con transporte del soluto y la gestión del agua subterránea.

La ecuación de flujo del agua subterránea se soluciona usando aproximación por diferencias finitas. La región del flujo se subdivide en celdas, en las cuales las características medias se asumen para ser uniformes. Las celdas se distribuyen mediante rejilla. Esto permite que las capas del modelo puedan tener un espesor diferente. La ecuación de flujo se escribe para cada bloque, lo que permite una total adaptación al caso real modelizado.

La simulación de distintas hipótesis de explotación para la adopción de la más favorable se efectuará con diversos criterios, en función de la siguiente casuística:

- Acuíferos simples y de extensión limitada: se simularían como una celda única en la aplicación WinPEST.
- Acuíferos extensos y/o con variabilidad espacial: las hipótesis de funcionamiento se simularían en el módulo MODFLOW, para lo cual el acuífero se discretizará en tantas celdas como puntos de bombeo se consideren.

Tras la estimación del balance hídrico de los acuíferos, se procederá a cuantificar los recursos renovables y, por tanto, la cantidad máxima a bombear sin reducir las reservas. Para cada uno de los acuíferos a modelizar se realizarán e interpretarán los ensayos de bombeo realizados.

Los resultados de la simulación finalmente aceptada, incluyendo las condiciones de bombeo, asignación concreta de volúmenes a cada captación, evolución piezométrica a largo plazo,

etc., se presentarían en gráficos y bloques diagramas suficientemente aclarativos para su fácil interpretación. Para el cálculo de los balances hídricos de los acuíferos considerados con objeto de poder calibrar el modelo matemático, se propone seguir la siguiente metodología:

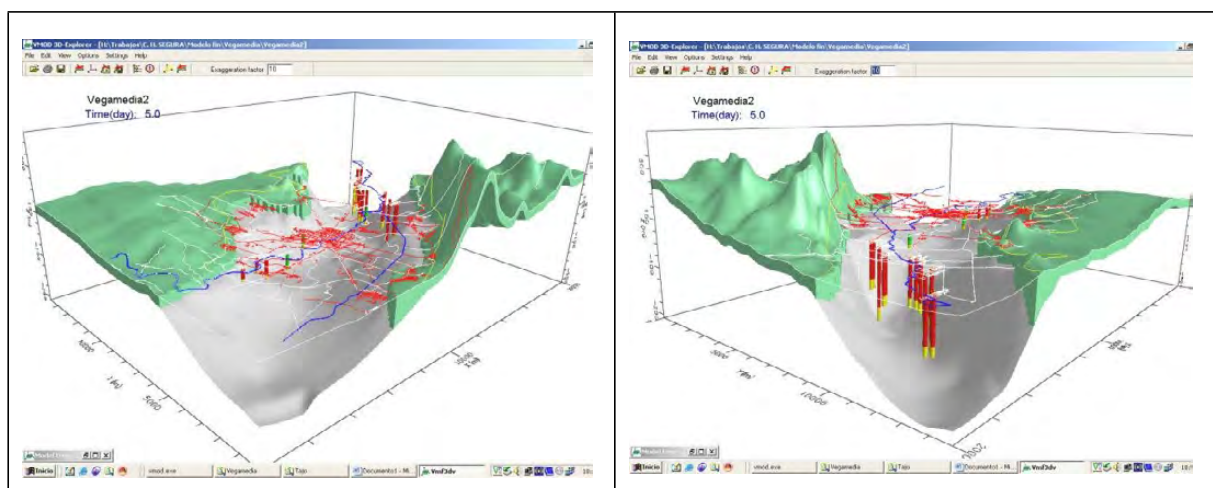
En este caso, se utilizarán conjuntamente, ya que ambos se complementan de cara al objetivo final del trabajo a desarrollar. La herramienta Hydro GeoAnalyst permite generar un modelo conceptual hidrogeológico y litológico del acuífero, que servirá de base, posteriormente, para el desarrollo del modelo de funcionamiento concebido desde Visual ModFlow Pro, ya que define las diferentes capas y las propiedades de cada una de ellas de cara a generación de los flujos subterráneos, tanto verticales como horizontales, dentro del acuífero.

Este modelo se utilizará, como herramienta de gestión para la toma de decisiones por parte de la Dirección Técnica de la Comunidad de Regantes que se trate, tales como: la predicción de zonas vulnerables al descenso piezométrico acusado; zonas de favorabilidad de captación; áreas sobreexplotadas o susceptibles de convertirse; visualización la evolución piezométrica histórica, de tal modo que se puedan establecer diferentes escenarios de explotación, en función de la prognosis de demanda, minimizando las afecciones, tanto al acuífero como a los equipos electromecánicos objeto de mantenimiento.

Una vez que dicha herramienta de gestión quede implantada en la Comunidad de Regantes o de usuarios que se trate, se garantizará durante el tiempo de explotación que se programe, tanto la calidad como la cantidad del recurso subterráneo con el fin de hacer sostenible tanto la explotación como el mantenimiento de la Comunidad de Regantes, optimizando los costes y garantizando el futuro de la explotación. A continuación se presenta un ejemplo de aplicación en un caso real de periodo de estiaje.

### **3) EJEMPLO DE APLICACIÓN. MODELIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA VEGA MEDIA DEL SEGURA**

El límite inferior en la modelización, se considera cerrado en los materiales impermeables del zócalo Triásico o Paleozoico (Ver figura nos 1 y 2. Elaboración Propia. WTECH, S.L.).



**Figura 1 y 2.** Distribución del sustrato en 3D. Situación de sondeos de emergencia.  
(Elaboración Propia WTECH,S.L.)

### 3.1) MODELO CONCEPTUAL GENERAL DE FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLÓGICO.

El área de estudio, objeto de modelización, se circunscribe a los materiales permeables (susceptibles de almacenar y transmitir fluido con permeabilidad  $> 10^{-8}$  m/s), presentes en el subsuelo de la vega Media de Murcia.

En el área objeto de cálculo, en primer término y de cara a los objetivos principales del estudio, se diferencian tres tipos de depósitos, el Cuaternario suprayacente, de baja permeabilidad (acuitardo), con espesores comprendidos entre 5 y 30 m según la zona, un nivel inferior de alta transmisividad, correspondiente al primer nivel de gravas permeable no captado por los sondeos proyectados con potencias entre 5 y 10 m, y un último nivel que comprende la totalidad del acuífero captado en profundidad, con espesores que oscilan entre 60 y 320 m, se trata de un acuífero multicapa, con alternancia de niveles de gravas y arenas permeables y niveles impermeables (limos y arcillas), reconociéndose desde 7 a 14 niveles permeables en profundidad, al que se le asignan los parámetros hidrodinámicos de los ensayos de bombeo realizados en los sondeos efectuados, en el entorno de los mismos y los parámetros consultados en la bibliografía existente, en los sectores donde existen lagunas de información.

La piezometría de la zona muestra una ligera pendiente hacia el NE, en la dirección del río Segura (aguas abajo), con direcciones preferenciales SO-NE y O-E y gradiente hidráulico aproximadamente del 2-1 o/oo. En función de la disposición geológica de los materiales que constituyen el acuífero y del análisis de la piezometría, el modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico para el cálculo hidráulico, debería contemplar la recarga del acuífero mediante infiltración del agua de lluvia y percolación a través de la amplia red de acequias (azarbes) de la Vega media y descarga directa principal al río Segura.

La infiltración de agua de lluvia se anula al tratarse de un periodo de sequía. La percolación desde las acequias (azarbes) también se descarta, dada la complejidad de la red existente y la incertidumbre en el conocimiento de los lechos permeables o impermeables. También se descarta la recarga directa desde el río Segura, al discurrir por un lecho de limos y arcillas (sobre el acuitardo superior), prácticamente impermeable, durante el recorrido en el área modelizada. De este modo, el cálculo se considera altamente conservador, favorable a la filosofía de la Declaración de Impacto.

La dirección del flujo dentro del acuífero tiende a ser sensiblemente horizontal, sobre todo en las zonas más deprimidas, debido al carácter impermeable de los materiales desarrollados en el tramo de acuífero cuaternario más superior (acuitardo).

### 3.2) DISCRETIZACIÓN ESPACIAL DEL MODELO.

Los materiales susceptibles de almacenar y transmitir fluido se discretizan espacialmente mediante superposición de una malla de elementos cuadrados de 200 m x 200 m de dimensión que se ajusta a los límites del área de estudio, con una extensión superficial de 14.800 m de largo (N-S) y 20.000 m de ancho (O-E), definida por 100 columnas (x), en dirección Este y 75 filas (y) en dirección Sur.

Por lo que respecta a la vertical, dirección Z se considera desde la cota -320 m, hasta la cota de 450 m, que corresponde a la mayor elevación del área de estudio. Hidrogeológicamente se han considerado como celdas inactivas todos los materiales prácticamente impermeables del Paleozoico, Triásico y Terciario, abarcando, en superficie, la mayor parte de los relieves positivos del área. Ver figuras nos 1 y 2 (Elaboración propia WTECH,S.L).



En los 330 m máximos, de zona modelizada en vertical, se han diferenciado un total de 3 capas, cuya combinación refleja, en general, las variaciones hidrodinámicas del terreno en función de los datos de campo recopilados, bombeos de ensayo y ensayos de permeabilidad realizados en los sondeos de explotación llevados a cabo (17 en total en la zona objeto de cálculo). En las zonas no prospectadas en el presente estudio, se han tomado los valores de parámetros hidrodinámicos existentes en la bibliografía, cedidos por la Confederación Hidrográfica del Segura.

### 3.3) LÍMITES, PARÁMETROS HIDRÁULICOS Y CONDICIONES DE CONTORNO.

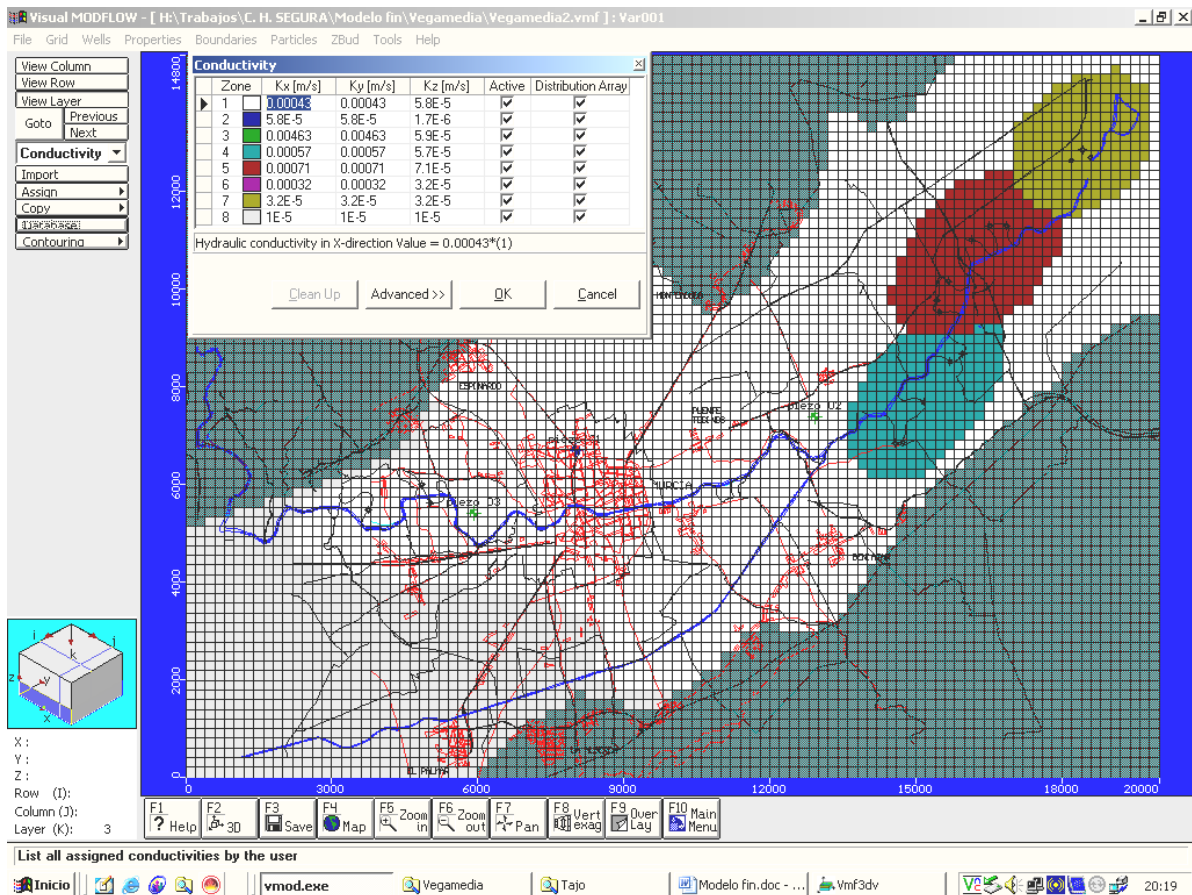
Los límites de la modelización que imponen las condiciones de borde del modelado son las siguientes ver figuras adjuntas (nos 1 y 2. Elaboración propia WTECH,S.L):

El tramo del Segura, donde se desarrolla la Vega Media, se asocia a una fosa tectónica, de dirección N-60 E, aún activa, en la que se han depositado sus arrastres durante el Cuaternario. Las rocas confinantes, prácticamente impermeables, sobre las que se desarrolla la fosa son metapelitas paleozoicas y en menor medida los mármoles triásicos de las Zonas Internas de las Cordilleras Béticas en la Vega Media, mientras que en el tramo de aguas abajo, comienzo de la Vega Baja corresponden a sedimentos miocenos de tipo detrítico y fundamentalmente margoso prácticamente impermeables.

Estos materiales de carácter impermeable constituyen tanto el sustrato como los límites meridionales y septentrionales de los materiales permeables del Cuaternario, ya que soportan la totalidad de los depósitos permeables existentes en el subsuelo más superficial del área de estudio.

Los depósitos cuaternarios alcanzan de 6 a 10 km de anchura por 150 a 320 m de profundidad en la Vega Media. La litología predominante es limosa, en la que se intercalan niveles más o menos continuos de gravas bien clasificadas y arcillas, existiendo una disminución general del tamaño de grano de aguas arriba a aguas abajo. A nivel de afloramiento, se diferencia un conjunto superior formado por una capa de limos de 10 a 15 m de espesor seguida por otra de gravas de 3 a 10 m de espesor, y un conjunto inferior con distribución heterogénea de niveles. En los bordes tanto meridionales y septentrionales como occidentales del área de estudio se ha estimado conveniente el no imponer un borde de potencial constante, quedando dicho límite abierto y con potencial variable en función de la piezometría inicial detectada en la primera campaña de piezométrica llevada a cabo (mes de julio de 2005).

Sobre la base del estudio hidrogeológico y de subsuelo previamente realizado, a cada celda del modelo se le asigna un valor de permeabilidad. De este modo se definen una serie de zonas de permeabilidad común, cuya geometría se muestra en las figura nº 3 (Elaboración Propia, WTECH,S.L), correspondientes a las capas 1, 2 y 3 de distribución de permeabilidades consideradas en el cálculo hidráulico realizado (permeabilidad horizontal  $k(x,y)$  y vertical  $k(z)$ ) en profundidad. Sus valores en el entorno de los sondeos de efectuados, coinciden con los resultados de los ensayos de bombeo realizados. En el resto, se han extrapolado los valores obtenidos en estudios anteriores. También se han tenido en cuenta los resultados de los sondeos de investigación llevados en fases anteriores.



**Figura 3.** Distribución de permeabilidades de la capa inferior nº 3 (acuífero multicapa captado). (Elaboración Propia WTECH,S.L.).

El valor de permeabilidad estimado para el acuitardo (capa nº 1), se sitúa en torno a  $5,8 \times 10^{-5}$  m/s, en la horizontal y  $1,7 \times 10^{-6}$  m/s, en la vertical, de acuerdo con estudios anteriores consultados. El valor de permeabilidad estimado para el primer nivel permeable (capa nº 2), se sitúa en torno a  $4,6 \times 10^{-3}$  m/s, en la horizontal y  $5,9 \times 10^{-5}$  m/s, en la vertical, también de acuerdo con estudios anteriores consultados. Mientras que el conjunto de materiales del acuífero multicapa inferior ensayados en los sondeos efectuados, varían entre  $7,1 \times 10^{-4}$  m/s y  $3,2 \times 10^{-5}$  m/s en la horizontal y  $7,1 \times 10^{-5}$  m/s y  $3,2 \times 10^{-5}$  m/s en la vertical. Para el resto de zonas no ensayadas, se adopta un valor de  $4,3 \times 10^{-4}$  m/s, en la horizontal y  $5,8 \times 10^{-5}$  m/s en la vertical, de acuerdo con los datos de estudios anteriores consultados.

Las diferentes zonas discretizadas con valores de coeficiente de almacenamiento constante, se corresponden con las definidas para las permeabilidades al tratarse, en general, de formaciones permeables por porosidad intergranular, coincidiendo las variaciones del coeficiente de almacenamiento con las de permeabilidad. El valor de parámetros de almacenamiento estimados para el acuitardo (capa nº 1), se sitúa en torno a  $S_s = 0.0015$ ;  $S_y = 0.03$ ; Porosidad eficaz = 0,03 y Porosidad total = 0,3, de acuerdo con estudios anteriores realizados. El valor de parámetros de almacenamiento estimados para el primer nivel permeable (capa nº 2), se sitúa en torno a  $S_s = 0.015$ ;  $S_y = 0.03$ ; Porosidad eficaz = 0,03 y Porosidad total = 0,4, de acuerdo con estudios anteriores realizados. Como valor general para los materiales acuíferos de la capa inferior ensayados en los sondeos se han estimado los siguientes valores de parámetros de almacenamiento  $S_s = 0.00017$ ;  $S_y = 0.00001$ ; Porosidad eficaz = 0,25 y Porosidad total = 0,35. En las zonas de la capa inferior no ensayadas se adopta el valor de  $S_s = 0.000026$ ;  $S_y = 0.0003$ ; Porosidad eficaz = 0,25 y Porosidad total = 0,35.

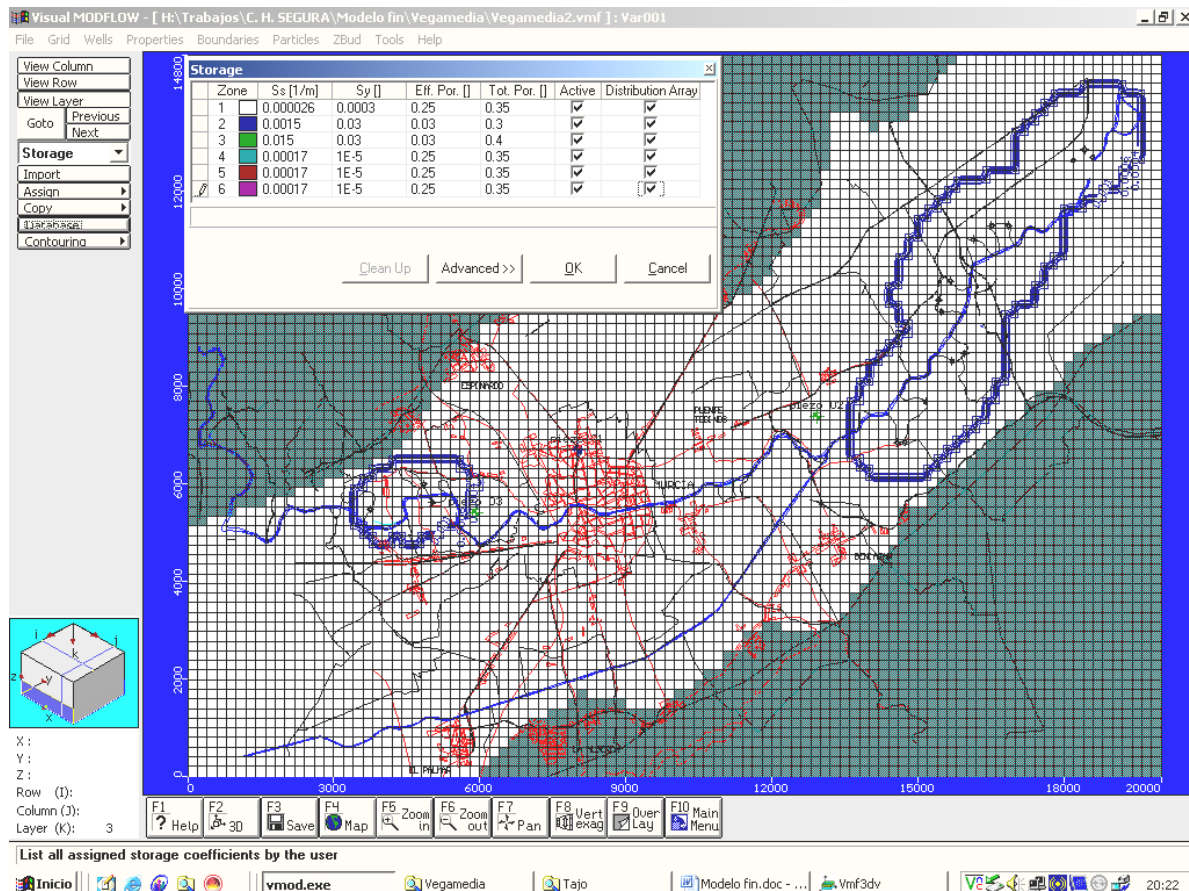
En la figura nº 4 (Elaboración Propia, WTECH,S.L), se presenta la distribución de los valores del coeficiente de almacenamiento, que coinciden con los de distribución de permeabilidades se representa la distribución espacial de los mismos. En dichos planos, se representan dos valores diferentes de coeficiente de almacenamiento.

Ss (1/m). Coeficiente de almacenamiento específico, que se define para un acuífero saturado como el volumen de agua que cede una unidad de volumen de acuífero cuando se deprime el nivel piezométrico del mismo una unidad.

S(-) o Sy. Coeficiente de almacenamiento de rendimiento, que se define como el volumen de agua que cede un prisma de acuífero de base cuadrada unitaria cuando se le deprime una unidad, consecuentemente no tiene dimensiones.

La recarga superficial del acuífero correspondiente a la infiltración del agua de lluvia y percolación a través de cursos superficiales reproduce la entrada de agua al sistema.

Tal y como se ha indicado la infiltración de agua de lluvia se anula al tratarse de un periodo de sequía. La percolación desde las acequias (azarbes) también se descarta, dada la complejidad de la red existente y la incertidumbre en el conocimiento de los lechos permeables o impermeables. También se descarta la recarga directa desde el río Segura, al discurrir por un lecho de limos y arcillas (sobre el acuitardo superior), prácticamente impermeable. De este modo, el cálculo se considera altamente conservador, favorable a la filosofía de la Declaración de Impacto.



**Figura 4.** Distribución de coeficientes de almacenamiento. (Elaboración Propia WTECH,S.L.).

### 3.4) CALIBRACIÓN. AJUSTES EN REGIMEN TRANSITORIO Y PERMANENTE.

El objetivo del ajuste en régimen permanente es reproducir de la forma más lógica posible, desde un punto de vista hidrogeológico, la situación hidrodinámica reflejada en la piezometría inicial del acuífero, contrastada con los datos de la campaña de piezometría inicial realizada. Este proceso es dinámico ya que existe un estrés impuesto en el modelo debido a la explotación continua de los pozos, sin existir bordes o potenciales de recarga, al simular un periodo extremo de sequía. Debido a ello, al tratarse de un cálculo hidráulico, el ajuste se lleva en régimen transitorio.

El proceso de calibración se ha estructurado en dos fases: En la primera calibración o calibración inicial, el objetivo consiste en depurar y corregir las posibles deficiencias del modelo conceptual, comprobando las condiciones de contorno, y evaluando de manera crítica algunos aspectos del modelo hasta ahora considerados como fiables. En la segunda fase de calibración o calibración final, se obtiene el modelo conceptual y numérico del acuífero más coherente con el conjunto de la información disponible.

Las modificaciones incluidas en el modelo inicial durante ambas etapas son:

Redistribución de las zonas de permeabilidad constante, en aquellas zonas donde existen lagunas de información con objeto de optimizar la calibración del modelo.

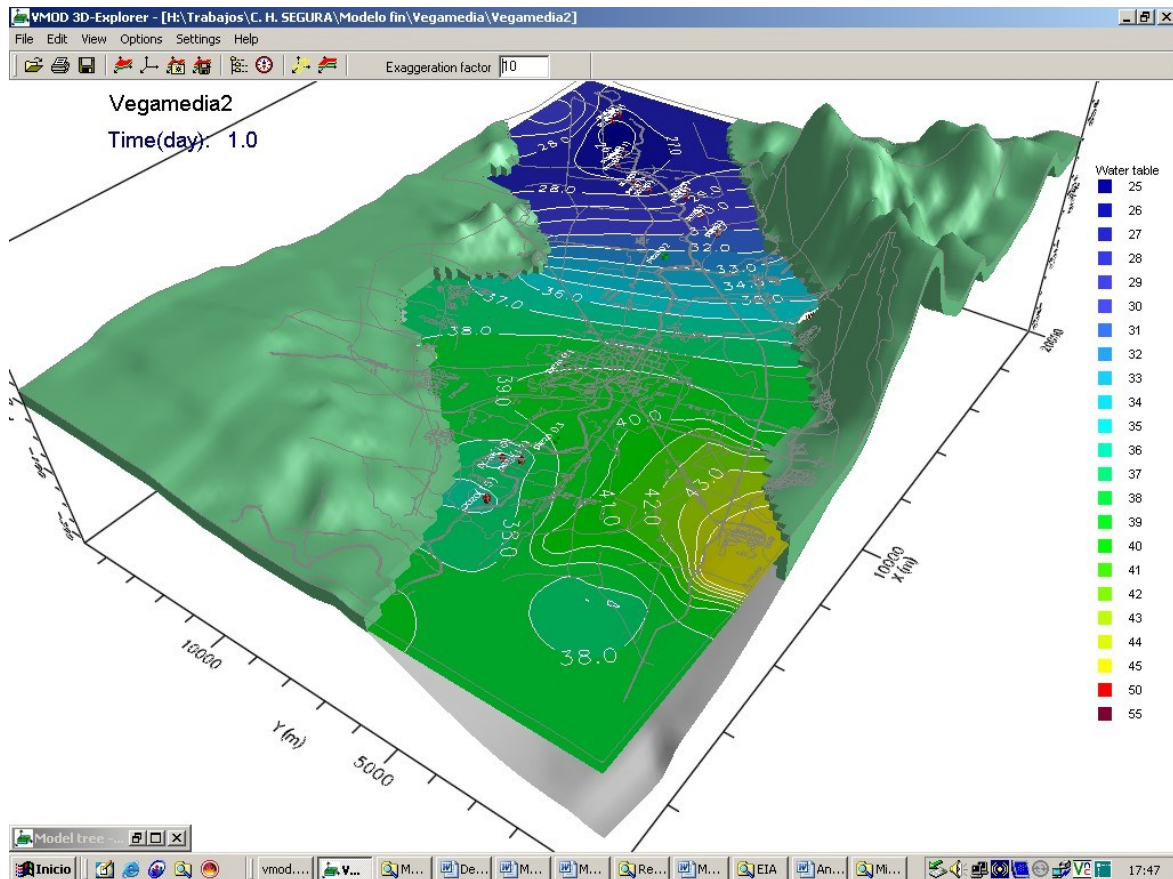
Redistribución de las zonas de coeficiente de almacenamiento en toda la extensión del modelo, principalmente dirigida a la optimización de los volúmenes de almacenaje, recarga y descarga de las formaciones permeables. En este caso no ha sido necesario el retocar los valores de coeficiente de almacenamiento inicialmente cargados.

Durante el proceso de calibración el modelo conceptual experimentó algunas modificaciones, sugeridas por las propias deficiencias del modelo conceptual original. Los cambios más notorios se basan, fundamentalmente, en la distribución orográfica de determinados sectores de la cuenca, comprobándose que algunos de los escarpes no producen saltos piezométricos y que otros tienen menor continuidad longitudinal que la inicialmente supuesta.

Por tanto el objetivo del ajuste en régimen transitorio es reproducir de la forma más lógica posible, desde un punto de vista hidrogeológico, la situación hidrodinámica reflejada en la variación piezométrica observada producida por los bombeos llevados a cabo en los sondeos de captación. Una vez ajustadas dichas variaciones se llevan a cabo las simulaciones de explotación futura.

Para calibrar el modelo en los pozos de explotación ha sido necesario efectuar un ajuste hasta alcanzar la distribución piezométrica del mes de julio del año 2005. Una vez alcanzado, se han tomado los niveles piezométricos obtenidos para comenzar la simulación futura de los escenarios previstos. La distribución piezométrica inicial se representa en la figura nº 5 (Elaboración Propia WTECH,S.L.). adjunta, ya calibrada con los piezómetros de observación principales controlados en el periodo de estudio.





**Figura 5.** Distribución piezométrica al primer día de bombeo. (Elaboración Propia WTECH,S.L.).

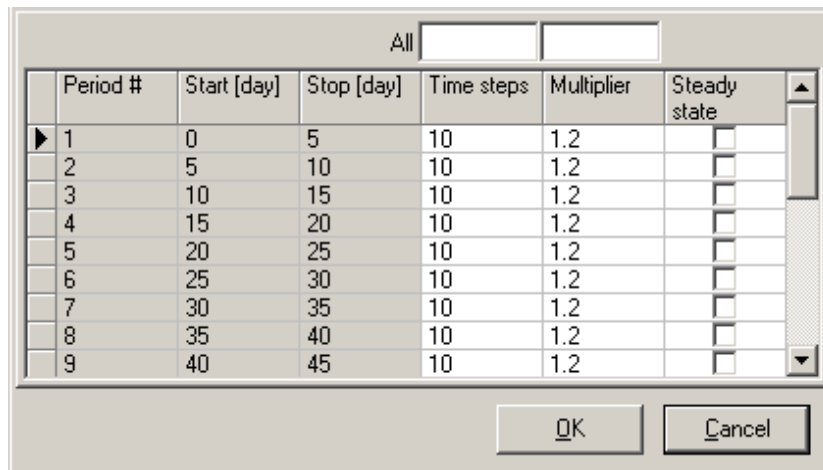
### 3.5) SIMULACIÓN DEL ESCENARIO DE SEQUÍA PREVISTO

En primer término, se lleva a cabo la simulación de una extracción continua de 1.870 l/s, de 17 sondeos de emergencia de captación de aguas subterráneas para periodos de sequía según el emplazamiento proyectado, captando el nivel acuífero multicapa inferior, del Cuaternario. La explotación se simula para un periodo de 45 días, de acuerdo con la declaración de impacto, tiempo máximo en que se prevé la puesta en funcionamiento continua de la explotación del acuífero Cuaternario en periodos de sequía.

De cada uno de los sondeos se extrae un caudal continuo de 110 l/s. La zona ranurada enfrentada al acuífero productivo tiene una potencia media entre 30 de 40 m situándose en todos los casos por debajo de los 30 m de profundidad.

En la figura nº 6 (Elaboración Propia WTECH,S.L.), se indica la correlación de los periodos de modelización con el tiempo real en días. Cada uno de los periodos se divide a su vez en 10 estadios de base de cálculo ("steps"). Posteriormente se efectúan las proyecciones a 1 y tres años y la restauración de niveles en el siguiente periodo húmedo.





Period #	Start [day]	Stop [day]	Time steps	Multiplier	Steady state
1	0	5	10	1.2	<input type="checkbox"/>
2	5	10	10	1.2	<input type="checkbox"/>
3	10	15	10	1.2	<input type="checkbox"/>
4	15	20	10	1.2	<input type="checkbox"/>
5	20	25	10	1.2	<input type="checkbox"/>
6	25	30	10	1.2	<input type="checkbox"/>
7	30	35	10	1.2	<input type="checkbox"/>
8	35	40	10	1.2	<input type="checkbox"/>
9	40	45	10	1.2	<input type="checkbox"/>

**Figura 6.** Discretización del espacio temporal en la modelización. (Elaboración Propia WTECH,S.L.).

Se han ubicado 3 piezómetros de referencia, con objeto de observar la evolución en tres puntos situados en el casco urbano, aguas arriba y aguas debajo de la Ciudad de Murcia. Piezómetro nº 1 (Emuasa), ubicado en el centro del casco urbano de Murcia, Piezómetro nº 2 (Machacanta), ubicado entre el casco urbano y la batería de 14 sondeos situada el Este, y Piezómetro nº 3 (La Arboleja), ubicado entre el casco urbano y la batería de 14 sondeos situada el Este, y Piezómetro nº 3 (La Arboleja).

### 3.6) DESCRIPCIÓN GENERAL DE RESULTADOS

En función del escenario proyectado para el cálculo hidráulico, a continuación se describen los resultados obtenidos.

En la simulación llevada a cabo, tal y como puede apreciarse en el video de evolución de piezometría en 3D, resultantes (ver figura adjunta nº 7. Elaboración Propia WTECH,S.L), con una depresión máxima de 3 a 2,5 m, sin tener en cuenta las pérdidas de carga, en la batería de sondeos situada aguas arriba de Murcia, parte alta de la cuenca y de 1 a 2 m aguas abajo de la ciudad de Murcia. Esta depresión coincide, en términos generales, con las observaciones piezométricas realizadas en diferentes campañas en los piezómetros del entorno de las captaciones, por lo que se considera una calibración aceptable en el cálculo hidráulico del modelo.

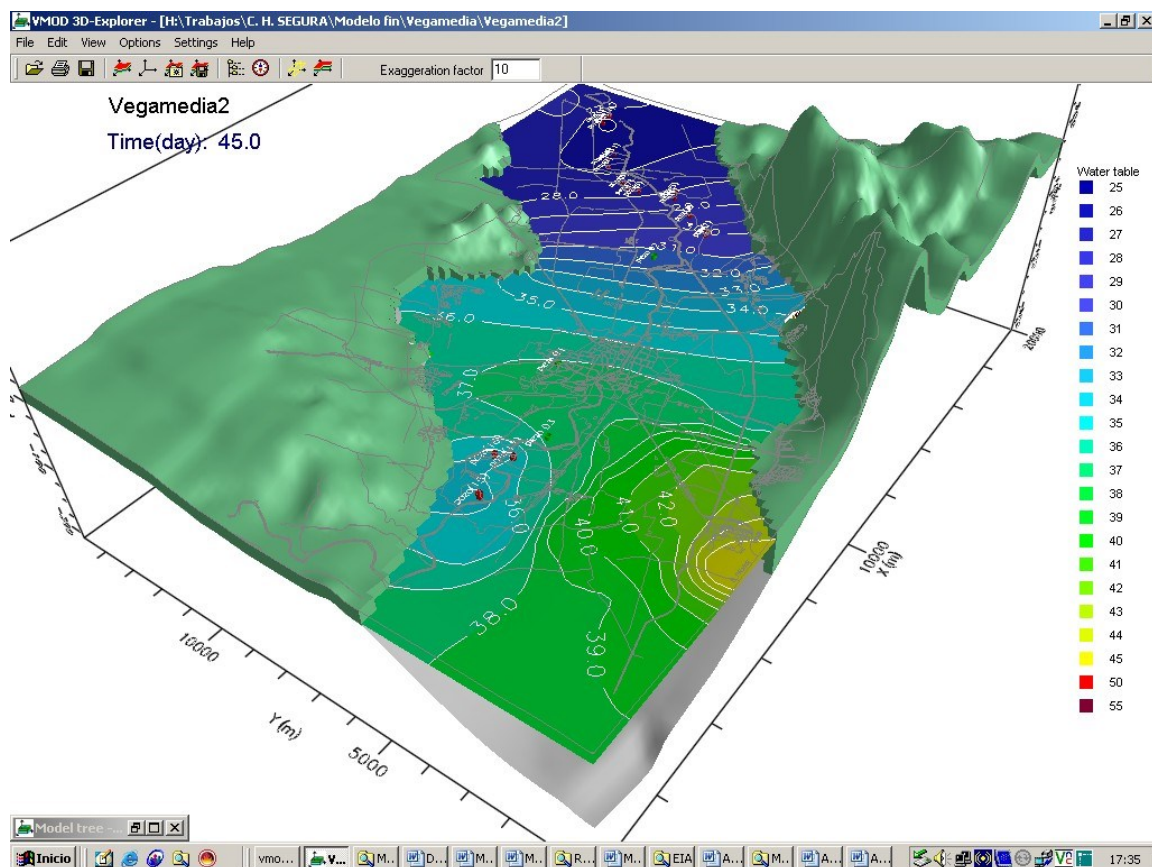
En las figuras nº 8 (Elaboración Propia WTECH,S.L) se observa la evolución piezométrica de los piezómetros de referencia seleccionados. Piezómetro nº 1 (Emuasa), ubicado en el centro del casco urbano de Murcia, Piezómetro nº 2 (Machacanta), ubicado entre el casco urbano y la batería de 14 sondeos situada el Este, y Piezómetro nº 3 (La Arboleja), ubicado entre el casco urbano y la batería de 14 sondeos situada el Este, y Piezómetro nº 3 (La Arboleja).

Tal y como puede apreciarse el descenso es menor aguas abajo de Murcia, del orden de 1 m, debido una distribución más amplia de potenciales hidráulicos por una mayor transmisividad y potencia del acuífero. Tanto en el casco urbano como aguas arriba de Murcia el descenso se sitúa en 2 m a los 45 días de bombeo, debido fundamentalmente a una menor transmisividad y potencia de los depósitos detríticos permeables.

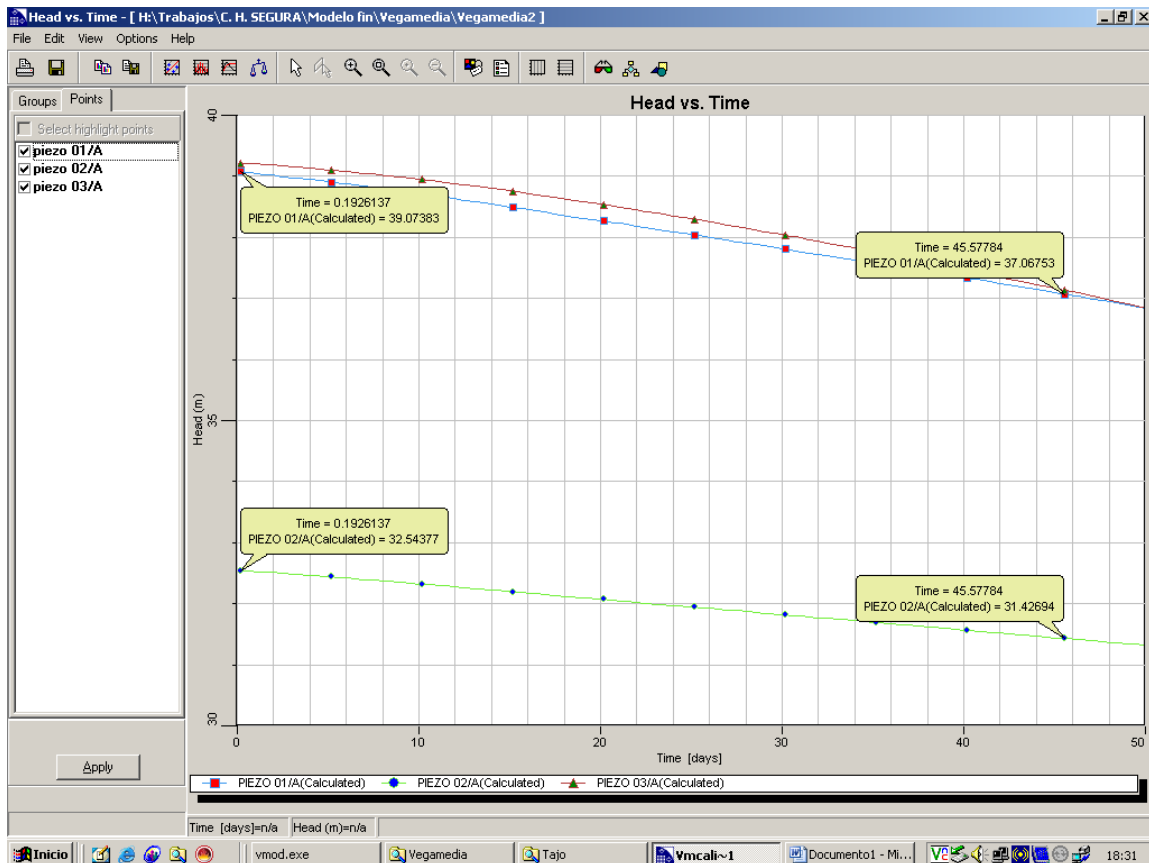
Se debe tener en cuenta que la modelización llevada a cabo es altamente conservadora, tal y como se ha expuesto en anteriores apartados. El radio de influencia del bombeo simulado en la batería de sondeos situados aguas abajo de Murcia alcanza prácticamente hasta el límite de los impermeables, debido a la alta transmisividad del acuífero inferior en conjunto. En la batería de tres sondeos situada aguas arriba de Murcia el radio limita inmediatamente en el impermeable septentrional y posteriormente se abre hacia el exterior.

Esta modelización ha servido como base para planificar toda la estrategia de bombeo en el acuífero de la Vega Media, durante el periodo 2005 – 2009, con objeto de no provocar afecciones significativas al acuífero, ni a las cimentaciones de las edificaciones de la ciudad de Murcia. Así como para proyectar y simular toda la batería estratégica de sondeos para paliar los efectos de la sequía en la Vega Media del Segura en este caso, alumbrándose un total de 40 sondeos en este sector todos con caudales superiores a 100 l/s. Se han llegado a extraer más de 70 hm<sup>3</sup> de la Vega media durante el periodo de sequía considerado, con una depresión máxima de 15 m en determinadas zonas críticas, alternando las zonas de bombeo, con objeto de minimizar afecciones, después de la explotación en el año 2009, se recuperan los niveles iniciales tal y como se simuló en la modelización.

Con la utilización de esta herramienta se ha propiciado de este modo la sostenibilidad del acuífero de la Vega Media del Segura ya que la explotación se acomoda a secuencias de normalidad y excepcionales, lo que favorece a que los posibles efectos que la explotación intensificada durante los periodos de emergencia y sequía, sean regenerados durante los periodos de normalidad.



**Figura 7.** Distribución piezométrica a los 45 días de bombeo. (Elaboración Propia WTECH,S.L.).



**Figura 8.** Evolución piezométrica en piezómetros de control seleccionados. (Elaboración Propia WTECH,S.L.).

#### 4) RESUMEN Y CONCLUSIONES

Las Directivas europeas, la DMA (incorporada a nuestro ordenamiento jurídico) y la relativa a la proyección de las Aguas Subterráneas contra la contaminación y el deterioro (Directiva 2006/118/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 12 de diciembre de 2006) confieren al agua un marcado carácter ambiental y como tal, establece que los objetivos de la gestión, manejo y explotación del agua deben enmarcarse en la sostenibilidad a fin de preservar la cantidad y calidad de los recursos y poder garantizar las demandas.

Esos principios han impregnado cuantas normas, planes y programas se refieren a las aguas en general y a las aguas subterráneas en particular. Hay una tendencia general a considerar como condición de sostenibilidad una tasa de extracciones próxima a los recursos renovables de cada acuífero. Esta regla de gestión no puede ser considerada de manera absoluta, siendo particularmente lesiva en lugares con climas áridos y semiáridos donde los periodos húmedos pueden encontrarse espaciados varios años. Por ello, se hace necesario el desarrollar herramientas que simulen con carácter plurianual las extracciones en las explotaciones, ya que las sequías son de varios años y recuperan su normalidad al final de los periodos de estiaje.

Por otra parte, resulta esencial tomar conciencia de que las masas de agua subterráneas son bienes del dominio público que todos tienen derecho a usar, mediante las oportunas concesiones y a los que resulta muy difícil –además de complejo y oneroso– impedir el acceso. Además, las decisiones de gestión de cada usuario se encuentran influidas por las de los

restantes beneficiarios del acuífero, cuyas decisiones, tendentes en cada caso a maximizar el propio beneficio, difícilmente coinciden con un óptimo desarrollo social y, con frecuencia, nada tiene que ver con el principio de sostenibilidad.

Esta situación viene determinada por una falta de información generalizada sobre los criterios básicos que han de regir en una adecuada utilización del agua subterránea y de fertilización de suelos agrícolas y, muy especialmente, por un alto grado de desconocimiento de las características propias de los acuíferos sobre los que se asientan las captaciones que sostienen actividades, lo que dificulta la consecución de objetivos medioambientales (conservación de la cantidad y preservación de la calidad) e incide negativamente sobre lo que debe ser una explotación sostenible y por tanto en los intereses de los agricultores.

De esto se deriva la necesidad de desarrollar una estrategia de gestión sostenible que se asiente en los siguientes principios básicos:

- Buen conocimiento hidrogeológico
- Derechos y usos existentes
- Participación de usuarios
- Control sistemático de la evolución del acuífero
- Desarrollo de herramientas de simulación de escenarios (modelización)
- Gestión integrada con otros recursos

Es necesario disponer de un buen conocimiento de los acuíferos, en especial de los procesos y cuantificación de la recarga y del funcionamiento hidrogeológico, así como la distribución espacial y en profundidad de las extracciones. También se hace necesario contar con herramientas de modelización como la que en este artículo se presentan que simulen los diferentes escenarios de explotación posibles y visualizar las posibles afecciones, a los efectos de planificar la explotación en períodos de emergencia, proyectando con antelación las respuestas ante escenarios previsibles (sequías, efectos del cambio climático, deterioro de la calidad del agua, etc.), minimizando de este modo, tanto las afecciones, como los impactos económicos que repercuten de forma directa en los agricultores en este caso, además de en la sociedad en general.

## **BIBLIOGRAFÍA**

CHS, 2007. Nueva aportación al conocimiento hidrogeológico del entorno urbano de Murcia. [http://www.chsegura.es/chs/cuenca/sequias/sondeos\\_profundos](http://www.chsegura.es/chs/cuenca/sequias/sondeos_profundos). 177 p. Murcia.

IGME. (1978). Investigación Hidrogeológica de la Cuenca Baja del Segura.

Manual. Groundwater Flow & Contaminant Transport Modeling Software.

Rueda, Ramón et al. (2.001). “Investigación de plaguicidas en las aguas subterráneas de la Vega Media del Segura (Murcia)”. VII Simposio de Hidrogeología. Murcia – 2.001.

Soto Venegas, José Manuel, Turrión Peláez, Luis Francisco \*, Martínez Arias, Alfredo\*\*; Hernández Soriano, J. Ignacio. (2008). Evolución Piezométrica En El Acuífero Profundo De La Vega Media Y Baja Del Segura. Uso Sostenible. IX Simposio de Hidrogeología Elche 2.008 (Volumen XXVIII).

Turrión Peláez, Luis Francisco; Martínez Arias, Alfredo; Soto Venegas, José Manuel; Hernández Soriano, J. Ignacio. (2008). Nueva Aportación Al Conocimiento De La Estructura



XXXIII Congreso Nacional de Riegos  
Universitat Politècnica de València, Valencia 2015  
DOI:<http://dx.doi.org/10.4995/CNRiegos.2015.1443>

Profunda Y De La Hidrogeología De Las Vegas Media Y Baja Del Segura, Murcia. IX Simposio de Hidrogeología Elche 2.008 (Volumen XXVIII).

Waterloo Hydrogeologic, 2005. HydroGeo Analyst.





# ESTUDIOS METODOLÓGICOS DEL EFECTO DEL REGADÍO SOBRE LA CALIDAD DE LAS AGUAS DE LAS MASAS ASOCIADAS A UNA ZONA REGABLE: EL CASO DEL SECTOR B-XII DE LA ZONA REGABLE DEL BAJO GUADALQUIVIR

*Martínez Beltrán, J.*

Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, Paseo Bajo de la Virgen del Puerto 3, 28005 Madrid, [julian.martinezbeltran@cedex.es](mailto:julian.martinezbeltran@cedex.es)

## Resumen

El objeto del estudio ha sido determinar los efectos de la agricultura de regadío del Sector B-XII en la detracción de agua del Guadalquivir y en los contenidos de sales y nitratos de sus aguas en el tramo asociado a este sector, así como en el agua subterránea subyacente. La dotación de agua asignada en la campaña 2012-2013 ha sido inferior a la calculada para satisfacer las necesidades de agua de riego de los cultivos y el control de la salinidad de los suelos. La detracción de agua para el riego de este sector está justificada si han de mantenerse sus beneficios socioeconómicos actuales. En el año hidrológico 2012-2013 el sector exportó más sales que las que entraron con el agua de riego lo que indica que siguen lavándose sales del subsuelo. El impacto sobre la salinidad del agua del río es limitado ya que la mayor masa de sales se evacua en otoño-invierno cuando los caudales del río son mayores y por tanto su capacidad de dilución. La salinidad del agua del río depende más de su caudal y de su efecto sobre la cuña de agua salobre marina que de la evacuación de sales con el agua de drenaje. La masa de nitratos exportada es también mayor que la importada con el agua de riego. Queda por determinar si se debe a nitratos aplicados en la campaña estudiada o de nitratos acumulados en el suelo por exceso de fertilización nitrogenada en campañas anteriores. El riego y el drenaje de las tierras del sector han contribuido a controlar el nivel freático según las necesidades de los cultivos y a disminuir progresivamente la salinidad del agua subterránea.

## Introducción

La agricultura de regadío tiene efectos socio económicos muy relevantes si la zona regable donde se practica ha sido correctamente planificada y diseñada y sus obras bien ejecutadas. Además, los sistemas de riego y drenaje deben ser adecuadamente operados y mantenidos por la comunidad de usuarios y por los propios regantes, que a su vez deben aplicar buenas prácticas agrarias. Sin embargo, un regadío detrae recursos hídricos de una masa de agua y la evacuación del agua de drenaje afecta a la calidad del agua de la masa asociada que lo recibe. Por ello, la Dirección General del Agua (DGA), del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, encomendó al CEDEX un estudio metodológico de esos efectos en tres zonas regables (con una extensión total de unas 85.000 ha): la zona regable en el delta por el Canal de la Derecha del Ebro, el Sector B-XII de la Zona Regable del Bajo Guadalquivir y la Zona Regable del Canal de Orellana. Este estudio (DGA/CEDEX, 2013) incluye la caracterización de cada zona, los efectos del riego y drenaje sobre las masas de agua asociadas y el uso sostenible del agua.

El objetivo de este artículo es sintetizar los resultados del trabajo realizado en el Sector B-XII, último de la Zona Regable del Bajo Guadalquivir, situado en la provincia de

Sevilla, siendo Lebrija la sede de su Comunidad de Regantes (CR-BXII). Tiene una superficie de 15.420 ha de las que 14.087 ha son tierras regables.

La transformación de sus tierras para su uso agrícola comenzó en la primera mitad del siglo XX, cuando la Compañía de Marismas del Guadalquivir construyó en la Sección III de Marismas un dique para impedir la entrada de agua exterior, 4 colectores y 2 compuertas de marea para evacuar al río el exceso de agua de lluvia. Tras los estudios edafológicos, hidrológicos y agronómicos de Grande Covián (1956 y 1967), el Instituto Nacional de Colonización (INC) construyó zanjas abiertas de drenaje en el subsector norte y posteriormente sistemas de tubería, una vez comprobado el funcionamiento del drenaje y la desalación de los suelos con agua de lluvia. En 1980, La Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG) y el Instituto Nacional de Reforma y Desarrollo Agrario (IRYDA) terminaron la construcción de los sistemas de riego y de drenaje. La Sección III pasó a ser el Sector B-XII de la zona regable, el IRYDA entregó a 1.142 concesionarios parcelas de 12,5 ha y se constituyó la CR-BXII.

Estudios del IRYDA (1984) mostraron que la evacuación del agua por gravedad era insuficiente para controlar el exceso de agua de lluvia en las zonas más bajas del sector. Por ello, construyó 4 estaciones de bombeo y la CHG posteriormente otras dos. Durante las sequías de la década de 1990, el sistema general de regulación de la cuenca no fue capaz de proporcionar las dotaciones de riego asignadas a este sector. Por ello, la CHG terminó en 2002 la construcción del embalse de Melendo con objeto de mejorar la regulación del tramo final del canal del Bajo Guadalquivir.

## Características del Sector B-XII

El **clima** es mediterráneo con influencia atlántica. La temperatura media anual en Lebrija es de 18,6°C. Julio tiene las temperaturas medias más elevadas: 35,3°C de máxima y 19,4°C de mínima. Las más bajas en enero: 15,9°C de y 5,2°C de mínima. Todos los años se superan los 40°C en varias ocasiones. Hay heladas unos 4 días al año de media (CR-BXII, 2009).

La precipitación media anual en la estación de La Señuela durante los últimos 36 años fue 494 mm. Las lluvias se concentran de octubre a abril, siendo noviembre y diciembre los meses con mayor precipitación. La variabilidad temporal es muy grande con años con menos de 300 mm y otros de pluviometría normal e incluso superior a la media (más de 1.000 mm en el año hidrológico 1995-1996). En invierno puede haber lluvias intensas en periodos cortos de tiempo: 80 mm en 24 horas y 124 mm en 3 días consecutivos, para un periodo de retorno de 10 años.

La evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) anual es superior a la precipitación anual. Durante los últimos 13 años en la estación Lebrija I, la  $ET_0$  fue 1.432,1 mm, con un máximo en julio de 217,5 mm (7,0 mm/d) y un mínimo en diciembre de 39,5 mm (1,3 mm/d). Existe falta de agua de marzo a octubre y exceso de noviembre a febrero.

Las **tierras** del sector están situadas en la llanura de estuario del río Guadalquivir sobre antiguos bancos (vetas), transiciones, depresiones (lucios) y cauces (caños). Aunque la cota media del terreno es de unos 3 m sobre el nivel medio del mar, los terrenos de caños y lucios están a 2,5-2,6 m.

Los **suelos** tienen más del 60 por ciento de arcilla de tipo expansivo, sin arena y en su estado natural eran salinos y sódicos. Las tierras carecían de drenaje natural debido a la baja permeabilidad de los suelos y a una capa impermeable a algo menos de un metro de profundidad. El perfil del suelo muestra una capa laborable de 25-30 cm con estructura poliédrica, una conductividad hidráulica ( $K$ ) mayor de 0,6 m/d y una porosidad efectiva ( $\mu$ ) en torno a 0,04. Por debajo existe un horizonte que llega hasta los 60-70 cm, con estructura prismática, grietas muy desarrolladas en estado seco y valores de  $K$  y  $\mu$  que decrecen con la profundidad hasta aproximadamente 0,1 m/d y 0,01 respectivamente. A partir de 60-70 cm, el subsuelo es compacto con  $K$  menor de 0,1 m/d (Martínez Beltrán, 1988).

La profundidad efectiva del suelo (unos 65 cm) ahora no es salina pero el subsuelo continúa siéndolo. En dicha profundidad el contenido medio de humedad a capacidad de campo es del 33,5 por ciento y la retención de humedad de unos 220 mm. La retención en el intervalo de agua útil varía entre 50 mm (IRYDA, 1984) y 60 mm (Lampe, 1998).

Una **masa de agua asociada** al sector es el tramo del río Guadalquivir que lo limita por el oeste. Su dique (cota 5 m) impide la entrada de agua superficial dándole una configuración de pólder. Las aguas en este tramo son de transición con influencia de mareas. Su caudal, regulado por la presa de Alcalá, Sevilla, varió en el otoño-invierno de 2009-2010 entre 5,4 m<sup>3</sup>/s y unos 2.900 m<sup>3</sup>/s y en la campaña de riego de 40 a 50 m<sup>3</sup>/s (DGA/CEDEX, 2012).

Durante los períodos de otoño-invierno de los años 2008-2013, el agua de este tramo del río tuvo una conductividad eléctrica (*CE*) de 1,1 dS/m con caudales entre 150 y 250 m<sup>3</sup>/s. Para caudales de unos 60 m<sup>3</sup>/s varió de 2,6 (aguas arriba) a 3,5-5,2 dS/m (aguas abajo) y para caudales menores de 10 m<sup>3</sup>/s entre 3 y 5,5 dS/m respectivamente. En primavera para caudales de 10-15 m<sup>3</sup>/s la *CE* fue respectivamente entre 5-7 y 10-13 dS/m. Durante las campañas de riego, con caudales superiores a 30 m<sup>3</sup>/s la *CE* varió entre 1,6-3,0 dS/m (aguas arriba) y 2-9 dS/m (aguas abajo) y al final del tramo 9-16 dS/m para caudales inferiores a 30 m<sup>3</sup>/s. Este aumento de la *CE* es debido a la entrada de agua de mar en el río.

Durante 2008-2013, la concentración de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) del agua varió desde unos 50 mg/l al inicio del tramo a 35 mg/l al final con un caudal de unos 50 m<sup>3</sup>/s, probablemente debido a que el agua de la cuña salina tiene menor  $\text{NO}_3^-$  que la del agua en Alcalá.

Otra **masa es de agua subterránea** de una capa colgada sobre la capa impermeable. Actualmente, los sistemas de drenaje subterráneo controlan el nivel freático por debajo de la zona radicular de los cultivos. La profundidad de dicho nivel se estimó mediante la ecuación de Boussinesq (1904) para flujo en régimen variable, ya que existe una relación directa entre la carga hidráulica sobre el nivel de los drenes y el caudal del agua de drenaje ( $q_{dr}$ ), en función de la *K* y del espaciamiento entre drenes situados sobre una capa impermeable.

El lavado ha reducido la *CE* del agua freática desde valores iniciales de 76 a 100 dS/m (INC, 1970). Si el nivel freático es alto el agua es actualmente (2013) ligeramente salina (*CE* entre 3 y 4 dS/m). Entre 30 y 65 cm la *CE* osciló entre 4 y 8 dS/m y en el subsuelo entre 10 y 15 dS/m. En la capa menos permeable la *CE* alcanza 28 dS/m. Sin embargo, en esa posición los caudales de drenaje son muy pequeños.

En abril de 2013, la  $\text{NO}_3^-$  del agua con nivel freático a unos 70-80 cm varió entre 70-90 mg/L en una parcela con trigo, 120-260 mg/L en otra de remolacha y en terrenos preparados para sembrar algodón entre 45 y 50 mg/L. En julio, en parcelas cultivadas de maíz unos 200 mg/L en el agua entre 30-45 cm, aumentando a 550-750 mg/L a 70-80 cm, para ser algo menor (265-425 mg/L) cuando el agua estaba más profunda. A 80-90 cm en parcelas con tomate entre 265 y 425 mg/L y en parcelas con algodón entre 180 y 400 mg/L.

El **sistema de riego** parte del embalse de Melendo (5 hm<sup>3</sup> de volumen efectivo) donde termina el canal del Bajo Guadalquivir con un caudal máximo de 22 m<sup>3</sup>/s. Tres tuberías conducen el agua hasta una cántara y tres canales secundarios (A, B y C) la distribuyen a los tres subsectores. Desde estos canales es bombeada mediante 13 estaciones a una red de tuberías enterradas que la conducen a las parcelas (Figura 1).

La CR-BXII opera y mantiene la red de riego desde el embalse hasta las tomas de parcela. La presión que proporciona el bombeo varía entre 30 y 40 m de columna de agua. Cada tubería secundaria suministra agua a 4 parcelas (caudal nominal de 0,88 Ls<sup>-1</sup>ha<sup>-1</sup>) y cada dos parcelas disponen de una toma con 22 L/s. Los agricultores riegan por aspersión con cobertura total, mediante surcos alternos y por goteo. En la campaña de 2013 regaron 6.000-7.000 ha por aspersión, unas 2.000 ha por goteo y el resto por surcos. Aplican dosis de riego de entre 65 y 100 mm según el método, el cultivo y su fase de desarrollo.

La *CE* media del agua de riego en marzo es de unos 2 dS/m y progresivamente disminuye desde 1,7 dS/m en mayo a 0,9 dS/m en agosto. La relación determinada entre la *CE* (dS/m) y los sólidos disueltos totales (*SDT* en g/L) fue 0,64. En 2009, la  $\text{NO}_3^-$  del agua aumentó de marzo a abril-mayo desde 1,65 a 9,4 para disminuir en junio-julio a 7,4 mg/L.

La **red de drenaje** consta de 4 colectores que terminan en 4 estaciones de evacuación del agua. Dos discurren paralelos al dique perimetral y sirven de drenes interceptores y de conexión de todas las estaciones. Trazados perpendicularmente a los colectores desaguan primarios a 2.000 m de distancia entre sí y a estos secundarios distantes entre sí 500 m que captan el agua de los drenes parcelarios (Figura 1). Los desagües son zanjas abiertas de sección trapecial constante en cada desagüe, su talud está protegido por vegetación natural salvo en algunos secundarios. El mantenimiento de colectores y primarios es responsabilidad de la CR-BXII.



**Figura 1.** Embalse de Melendo y sistemas de riego y de drenaje del Sector B-XII

Los drenes parcelarios son superficiales, para desaguar la escorrentía superficial del exceso de agua de lluvia, y subterráneos de 250 m de longitud, de cerámica de 80 mm de diámetro (760 ha con drenes de PVC de 60 mm) colocados a una profundidad aproximada de 1 m y con una pendiente del 1 por mil a espaciamentos de entre 5 y 10 m.

El IRYDA diseñó sus estaciones para un  $q_{dr}$  máximo en la época de lluvias de 12,8 mm/d ( $1,48 \text{ Ls}^{-1}\text{ha}^{-1}$ ) y durante la campaña de riego de 1,2 mm/d ( $0,14 \text{ Ls}^{-1}\text{ha}^{-1}$ ) (Vázquez Guzmán, 1999). La capacidad actual es de  $45 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $2,92 \text{ Ls}^{-1}\text{ha}^{-1}$  y 25,2 mm/d). Todas las bombas son verticales sumergidas (menos Vetallengua). La altura dinámica máxima de elevación es de 5 m y la altura geométrica de 3,8 m (nivel más bajo del agua en el colector en la campaña de riego y nivel del río en pleamar de 4 m).

La capacidad y potencia de las bombas varía de  $0,75 \text{ m}^3/\text{s}$  y 75 CV a  $5,0 \text{ m}^3/\text{s}$  y 400 CV. La CR-BXII las pone en funcionamiento ante el riesgo de precipitaciones intensas con objeto de bajar el nivel del agua en la red. Durante la campaña de riego opera por la noche una de las bombas de menor capacidad de cada estación. Las bombas más recientes solamente funcionan en momentos de máxima evacuación y las compuertas generalmente permanecen cerradas.

Los **cultivos** más importantes por su extensión en invierno-primavera son remolacha y trigo. Los agricultores los siembran durante noviembre y cosechan la remolacha en julio con rendimientos medios de 80-90 t/ha. El trigo a final de mayo principios de junio con rendimientos de 6.000-7.000 kg/ha. En 2012-2013 cultivaron 1.366 ha de remolacha (9,8 por ciento de las 13.916 ha cultivadas esa campaña) y 1.383 ha de trigo (9,9 por ciento). A partir de marzo precisan riego para cubrir su déficit de precipitación.

En primavera-verano: algodón, tomate y maíz. En menor extensión: girasol, alfalfa, zanahoria y cebolla. En 2013 los agricultores cultivaron 6.258 ha (45 por ciento de la superficie cultivada) de algodón. Lo cosechan de octubre a noviembre pero solamente lo riegan por surcos hasta septiembre, pues durante este mes el cultivo absorbe humedad del



suelo. Sus rendimientos medios varían entre 4.000 y 4.500 kg/ha. El tomate para uso industrial ocupó 1.645 ha en 2013 (11,8 por ciento). Lo plantan de marzo a abril y lo cosechan durante la segunda quincena de julio y la primera de agosto. Prácticamente en su totalidad lo riegan por goteo. Sus rendimientos pueden alcanzar actualmente 130 t/ha. De maíz cultivaron 1.843 ha (13,2 por ciento). Lo siembran a final de marzo y lo cosechan a final de agosto y principios de septiembre. Lo riegan por surcos y por goteo. Sus rendimientos superan las 12 t/ha de grano. El girasol ocupó 935 ha (el 6,7 por ciento). También lo siembran durante la segunda quincena de marzo y lo cosechan a final de julio.

La rotación habitual es un cultivo de verano (algodón o tomate) seguido al menos cada tres años de uno de invierno-primavera (trigo o remolacha). Así queda garantizado un periodo de tiempo en verano para subsolar en suelo seco.

## Balances de agua

El balance de agua es del año hidrológico 2012-2013 porque el de la campaña anterior es incompleto. Considera el sector en su totalidad, porque todas las estaciones de bombeo están conectadas entre sí por la red de desagües, y las entradas de agua (riego y precipitación) y las salidas (consumo de agua de los cultivos y drenaje del exceso de agua). La diferencia entre entradas y salidas durante el año hidrológico equivale al aumento o disminución de la humedad almacenada en el suelo.

Los resultados de los cálculos para la campaña 2012-2013 muestran los **volúmenes mensuales suministrados y evacuados** en cada estación y en el conjunto del sector (DGA/CEDEX, 2013) que se presentan convertidos en alturas de lámina de agua (Tabla 1).

**Tabla 1.** Cantidades de agua de riego suministrada y de agua de drenaje evacuada durante la campaña de riego 2012-2013

Mes	Superficie cultivada ha	Área B-XII ha	Suministros de agua m <sup>3</sup>	Volúmenes evacuados m <sup>3</sup>	Riego		Drenaje			e <sub>a</sub>
					m <sup>3</sup> /ha	mm	m <sup>3</sup> /ha	mm	mm/d	
Oct-12	587,50	15.420	0	1.014.120	0	0	65,77	6,58	0,21	-
Nov-12	2.360,29	15.420	0	4.921.560	0	0	319,17	31,92	1,06	-
Dic-12	2.860,29	15.420	0	1.289.520	0	0	83,63	8,36	0,27	-
Ene-13	2.860,29	15.420	0	1.549.800	0	0	100,51	10,05	0,32	-
Feb-13	2.860,29	15.420	3.167.118	2.801.880	1.107,27	110,78	181,70	18,17	0,65	0,84
Mar-13	13.585,09	15.420	0	12.209.760	0	0	791,81	79,18	2,55	-
Abr-13	13.797,79	15.420	4.837.836	4.233.960	350,62	35,06	274,56	27,46	0,92	-
May-13	13.797,79	15.420	13.445.842	2.875.680	974,49	97,45	208,42	20,84	0,67	0,79
Jun-13	12.390,79	15.420	15.950.205	1.941.480	1.287,26	128,73	156,70	15,69	0,52	0,88
Jul-13	12.390,79	15.420	20.752.672	2.280.240	1.674,85	167,48	184,03	18,40	0,59	0,89
Ago-13	9.380,12	15.420	17.237.137	1.193.040	1.837,62	183,76	127,19	12,72	0,41	0,93
Sep-13	6.558,20	15.420	2.066.454	755.640	315,09	31,51	115,22	11,52	0,38	0,63
<b>Campaña</b>			<b>77.457.264</b>	<b>37.066.680</b>	<b>7.547,22</b>	<b>754,72</b>	<b>2.608,70</b>	<b>260,87</b>		

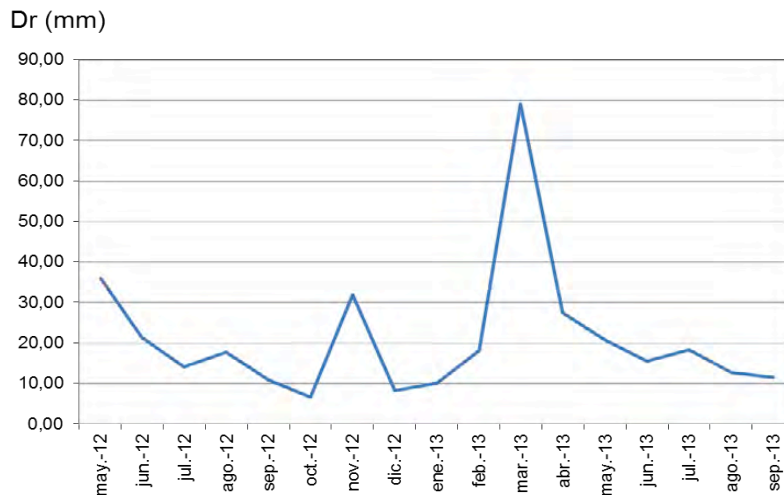
Los volúmenes de agua aportados se han estimado a partir de los suministros de la CHG a la CR-BXII y a la zona de Toril. Como la superficie del sector supone el 93,4 por ciento, se ha asumido que el sector ha recibido el mismo porcentaje de agua. A este volumen se ha descontado el de sus usos agro-industriales y termo-solares.

La CR-BXII midió mensualmente a partir de mayo de 2012 las horas de funcionamiento de cada uno de los grupos de cada una de las 7 estaciones de bombeo de agua de drenaje. Estimó el caudal que cada grupo podría elevar teniendo en cuenta las



características de las bombas. El cálculo considera la superficie cultivada durante la campaña de riego, cuando se asume que toda la precipitación es efectiva.

En otoño-invierno con lluvias que producen escorrentía, el cálculo considera toda la superficie intramuros del dique perimetral. Entonces las estaciones bombean un mayor volumen de exceso de lluvia (Figura 2). En verano el volumen de agua de drenaje desciende de mayo a septiembre, por ir decreciendo el área regada y el consumo de los cultivos. Durante los períodos de lluvia el caudal de drenaje ( $q_{dr}$ ) es variable y se debe principalmente a drenaje superficial. El  $q_{dr}$  medio se mantuvo casi constante de junio a septiembre (0,53 mm/d en 2012 y 0,51 mm/d en 2013), confirmando que la aplicación del agua de riego es muy constante y con alta eficiencia (de junio a agosto  $e_a$  media de 0,9).



**Figura 2.** Variación de la lámina de drenaje durante el período estudiado

El cálculo de la **precipitación efectiva** para los cultivos ha partido de un valor medio de la precipitación media mensual de las estaciones consideradas (DGA/CEDEX, 2013), descontando la escorrentía estimada a partir de los datos de la Tabla 1. En el período considerado sólo se ha producido claramente escorrentía en noviembre de 2012 y de febrero a marzo de 2013 (Tabla 2). Los resultados indican que no hubo escorrentía de agua de lluvia hasta el otoño de 2012 y ésta cesó al comienzo de la primavera de 2013.

**Tabla 2.** Cálculo de la precipitación efectiva durante el año hidrológico 2012-2013

Mes	P (mm)			P media mm	Drenaje mm	P efectiva mm	P <sub>ef</sub> /P
	Señuela	Lebrija I	Melendo				
Octubre 2012	111	102,6	100	104,53	6,58	97,95	0,94
Noviembre 2012	96,5	108,4	110	104,97	31,92	73,05	0,70
Diciembre 2012	27	33,8	42	34,27	8,36	25,91	0,76
Enero 2013	52	54,4	71	59,13	10,05	49,08	0,83
Febrero 2013	73,5	67,8	72,5	71,27	18,17	53,10	0,75
Marzo 2013	132	163,3	198	164,43	79,18	85,25	0,52
Abril 2013	75	28,2	35	46,07	0	46,07	1
Mayo 2013	2,5	7,2	3	4,23	0	4,23	1
Junio 2013	0	0	0	0,00	0	0,00	-
Julio 2013	0	0	0	0,00	0	0,00	-
Agosto 2013	0	0	0	0,00	0	0,00	-
Septiembre 2013	10	17,4	2	9,80	0	9,80	1
<b>Campaña 2012-2013</b>	<b>579,5</b>	<b>583,1</b>	<b>633,5</b>	<b>598,7</b>	<b>154,26</b>	<b>444,44</b>	

El cálculo del **consumo de agua de los cultivos** (Tabla 3) parte de los datos de  $ET_0$  de la estación Lebrija I y de los coeficientes de cultivo ( $K_c$ ) de la CR-BXII (2009). Considera la superficie ocupada cada mes por los principales cultivos, que en conjunto representaron en la campaña 2012-2013 el 98,1 por ciento de las tierras agrícolas del sector. El resto incluye el barbecho que prácticamente no consume agua (1,1 por ciento de la superficie).

**Tabla 3.** Cálculo del consumo de agua durante la campaña 2012-2013

Mes	Superficie ha	Consumo			
		m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> /ha	mm	mm/d
Octubre 2012	587,50	248.088,00	422,28	42,23	1,36
Noviembre 2012	2.360,29	424.301,00	179,77	17,98	0,60
Diciembre 2012	2.860,29	323.711,00	113,17	11,32	0,37
Enero 2013	2.860,29	579.263,00	202,52	20,25	0,65
Febrero 2013	2.860,29	1.191.850,00	416,69	41,67	1,49
Marzo 2013	13.585,09	4.283.050,00	315,28	31,53	1,02
Abril 2013	13.797,79	11.314.535,00	820,03	82,00	2,73
Mayo 2013	13.797,79	19.502.559,00	1.413,46	141,35	4,56
Junio 2013	12.390,99	26.770.341,00	2.160,47	216,05	7,20
Julio 2013	12.390,99	27.178.388,00	2.193,40	219,34	7,08
Agosto 2013	9.380,12	15.047.452,00	1.604,19	160,42	5,17
Septiembre 2013	6.558,20	4.333.301,00	660,75	66,07	2,20
<b>Campaña 2012-2013</b>		<b>111.196.839,00</b>	<b>10.501,98</b>	<b>1.050,20</b>	

El balance de agua en el año hidrológico 2012-2013 (Tabla 4) utiliza los valores de las entradas y salidas de agua (Tablas 1-3).

**Tabla 4.** Balance de agua durante el año hidrológico 2012-2013

Mes	Entradas de agua		Salidas de agua		$\Delta W$ mm
	Riego mm	Precipitación efectiva mm	Consumo mm	Drenaje mm	
Octubre 2012	0	97,95	42,23	6,58	49,14
Noviembre 2012	0	73,05	17,98	31,92	23,15
Diciembre 2012	0	25,91	11,32	8,36	6,23
Enero 2013	0	49,08	20,25	10,05	18,78
Febrero 2013	110,78	53,10	41,67	18,17	104,04
Marzo 2013	0	85,25	31,53	79,18	-25,46
Abril 2013	35,06	46,07	82	27,46	-28,33
Mayo 2013	97,45	4,23	141,35	20,84	-60,51
Junio 2013	128,73	0	216,05	15,69	-103,01
Julio 2013	167,48	0	219,34	18,4	-70,26
Agosto 2013	183,76	0	160,42	12,72	10,62
Septiembre 2013	31,51	9,8	66,07	11,52	-36,28
<b>Campaña 2012-2013</b>	<b>754,72</b>	<b>444,44</b>	<b>1050,21</b>	<b>260,87</b>	<b>-111,92</b>

Durante la campaña los cultivos utilizaron aproximadamente 112 mm de la reserva de agua del suelo, casi la mitad de la retención de humedad (unos 220 mm). En el otoño-invierno el suelo aumentó su reserva de agua. A partir de marzo, los cultivos comenzaron a completar sus necesidades de agua con parte de la humedad del suelo. En el otoño no empezó a haber drenaje subterráneo significativo hasta que se repuso cierta cantidad de humedad del suelo: unos 104 mm de déficit acumulados desde agosto a final de octubre, cifra similar a los 100-120 mm observados en el sector durante los años que lleva cultivándose en regadío. Al nivel de precisión de este estudio, los resultados del balance de agua son lo suficientemente fiables para aceptarlos, así como los volúmenes de agua evacuados estimados por la CR-BXII y utilizados en los siguientes apartados.

## Efectos del riego sobre la detracción de agua en el río Guadalquivir

En la campaña 2012-2013 el consumo de agua de riego de los principales cultivos del sector ascendió a unos 82,8 hm<sup>3</sup> (Tabla 5). Para una superficie de 13.798 (99,2 por ciento de la cultivada ese año), el consumo medio fue de 6.003,6 m<sup>3</sup>/ha. El cálculo de las necesidades de agua de riego en parcela considera una e<sub>a</sub> de 0,9 (Tabla 1). Podría ser algo mayor en las parcelas regadas por goteo y algo menor en las regadas por surcos y por aspersión. Pérdidas de agua por percolación del 10 por ciento son suficientes para el lavado de las sales aportadas con el agua de riego. Las necesidades medias de agua de riego en parcela serían para la campaña 2012-2013 de 6.670 m<sup>3</sup>/ha.

Tanto para la conducción del agua de riego hasta las estaciones de bombeo como para su distribución se han supuesto eficiencias de 0,95. En el primer caso las pérdidas de agua lo son por evaporación directa en los tres canales del sector pues las de sus aliviaderos son excepcionales. En la distribución posiblemente la eficiencia real sea mayor que la considerada, porque si se producen pérdidas notables de agua la CR-BXII repara las fugas. Con una eficiencia global de conducción-distribución del agua de 0,9 la dotación media de agua de riego para la campaña considerada sería de unos 7.410 m<sup>3</sup>/ha. Si la CHG suministró 77,5 hm<sup>3</sup> a las tierras regables del sector (13.807 ha) en esa campaña de riego, resulta una dotación media disponible de 5.610 m<sup>3</sup>/ha claramente inferior a la dotación de la campaña de riego anterior (6.896 m<sup>3</sup>/ha) y a la calculada.

**Tabla 5.** Consumos de agua de los principales cultivos durante la campaña 2012-2013

Cultivo	Superficie ha	ET <sub>c</sub> mm	P <sub>ef</sub> consumida mm	W consumida mm	I mm	Consumo parcela	
						m <sup>3</sup> /ha	m <sup>3</sup>
Remolacha	1.365,99	872,14	173,79	100	598,35	5.983,5	8.173.401,17
Trigo	1406,8	473,88	284,89	96,5	92,49	924,9	1.301.149,32
Algodón	6258	883,20	79,74	100	703,46	7.034,6	44.022.526,80
Tomate	1.644,88	754,18	84,99	100	569,19	5.691,9	9.362.492,47
Maíz	1.886,80	880,53	69,94	100	710,59	7.105,9	13.407.412,12
Girasol	935,12	650,12	66,66	100	483,46	4.834,6	4.520.931,15
Hortalizas	212,70	802,65	50,18	100	652,47	6.524,7	1.387.803,69
Alfalfa	87,50	1135,52	280,76	100	754,76	7.547,6	660.415,00
<b>Total</b>	<b>13.797,79</b>						<b>82.836.131,72</b>

Una primera conclusión es que el riego pudo ser deficitario en la campaña estudiada si los coeficientes k<sub>c</sub> utilizados fueron correctos y el aporte de humedad del suelo también.

## Efectos del riego y del drenaje sobre la calidad del agua del río Guadalquivir

El **balance de sales** durante la campaña 2012-2013 (Tabla 6) parte del balance de agua (Tabla 4). Como aportación de sales considera las aplicadas con el agua de riego y como evacuación las disueltas en el agua de drenaje bombeada al río. Utiliza los datos medios del agua en El Cuenco durante el período 2006-2010 y considera el promedio de los  $SDT_{dr}$  en los canales de aproximación a las estaciones de bombeo.

Tabla 6. Balance de sales durante la campaña 2012-2013

Mes	Sales aportadas				Sales evacuadas				$\Delta Z$
	Riego		$SDT_i$ g/l	t/ha	Drenaje		$SDT_{dr}$ g/l	t/ha	
	mm	m <sup>3</sup> /ha			mm	m <sup>3</sup> /ha			
Octubre 2012	0	0	-	0	6,58	65,8	-	-	-
Noviembre 2012	0	0	-	0	31,92	319,2	6,56	2,09	-2,09
Diciembre 2012	0	0	-	0	8,36	83,6	8,21	0,69	-0,69
Enero 2013	0	0	-	0	10,05	100,5	7,77	0,78	-0,78
Febrero 2013	110,78	1.107,8	1,21	1,34	18,17	181,7	8,71	1,58	-0,24
Marzo 2013	0	0	-	0	79,18	791,8	5,70	4,51	-4,51
Abril 2013	35,06	350,6	1,13	0,40	27,46	274,6	6,48	1,78	-1,38
Mayo 2013	97,45	974,5	1,06	1,03	20,84	208,4	5,54	1,15	-0,12
Junio 2013	128,73	1.287,3	0,81	1,04	15,69	156,9	5,04	0,79	0,25
Julio 2013	167,48	1.674,8	0,68	1,14	18,4	184	3,89	0,72	0,42
Agosto 2013	183,76	1.837,6	0,60	1,10	12,72	127,2	3,31	0,42	0,68
Septiembre 2013	31,51	315,1	0,60	0,19	11,52	115,2	3,12	0,36	-0,17
<b>2012-2013</b>	<b>754,72</b>	<b>7.547,2</b>	<b>-</b>	<b>6,24</b>	<b>260,87</b>	<b>2.608,7</b>	<b>-</b>	<b>14,88</b>	<b>-8,64</b>

El agua de drenaje que llega a las estaciones de bombeo y es evacuada al río Guadalquivir sigue siendo moderadamente salina. En 2013, la  $CE$  de esta agua disminuyó desde 13,3 dS/m en abril a 7,3 dS/m en julio. En términos de  $SDT$  varió durante el año 2012-2013 de 7,3 g/L en otoño-invierno a 5,6 g/L en primavera, descendiendo progresivamente durante la campaña de riego desde 4,7 g/L en junio hasta unos 3 g/L al final en septiembre-octubre (Figura 4). El gráfico muestra una misma tendencia en las aguas de drenaje que llegan a todas las estaciones de bombeo. Vetallengua en este período no bombeó agua.

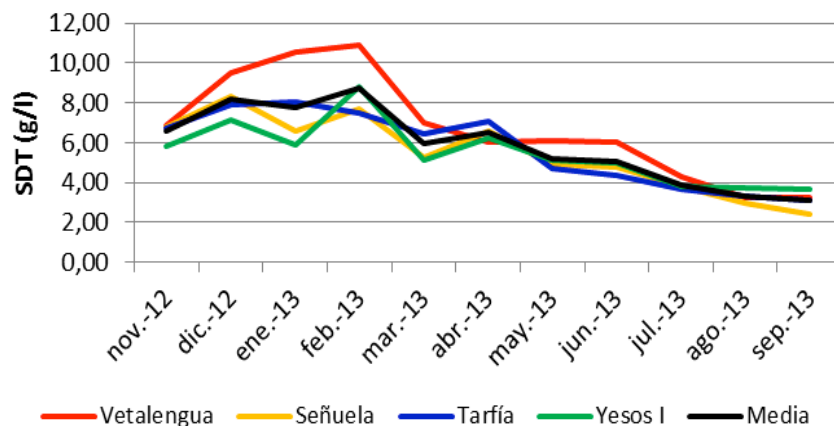
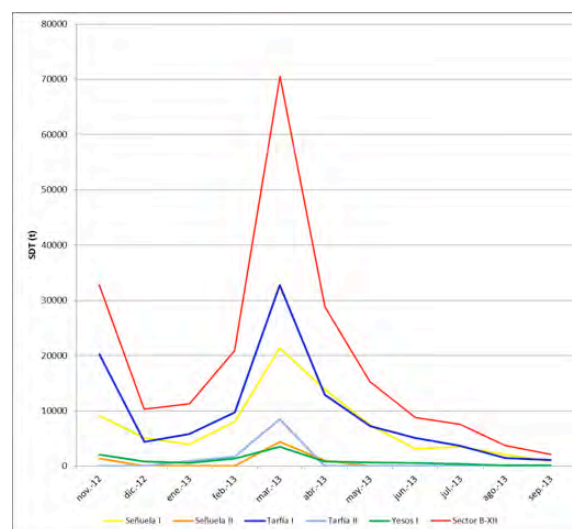


Figura 4. Variación del contenido medio de sales en el agua de drenaje durante la campaña 2012-2013

El balance indica que las tierras del sector perdieron sales durante dicha campaña (8,6 t/ha). Solamente el balance es positivo de junio a agosto, cuando no hay lavado por agua de lluvia y la fracción de lavado es pequeña, por regar los agricultores con una eficiencia muy alta. Las sales acumuladas en esta fase son lavadas posteriormente durante el otoño-invierno con agua de lluvia y evacuadas por los drenes subterráneos. Esta pérdida de sales se debe a que el subsuelo del sector sigue siendo salino y lo seguirá siendo. La masa de sales evacuadas en cada estación de bombeo y en el conjunto del sector, durante la campaña 2012-2013, se ha calculado multiplicando los volúmenes de agua evacuada cada mes por los *SDT* en el agua de cada canal de aproximación (Tabla 7 y Figura 5).

**Tabla 7.** Masa de sales evacuadas en cada estación de bombeo y en el conjunto del sector durante la campaña 2012-2013

Mes	Masa de sales (t)					
	Señuela I	Señuela II	Tarfía I	Tarfía II	Yesos I	Sector B-XII
Octubre 2012	-	-	-	-	-	-
Noviembre 2012	9.160,32	1.383,93	20.218,57	0	2.065,00	<b>32.828,81</b>
Diciembre 2012	5.157,04	0	4.382,46	0	806,27	<b>10.345,78</b>
Enero 2013	3.981,66	0	5.783,01	968,11	554,36	<b>11.287,15</b>
Febrero 2013	8.048,33	58,06	9.729,53	1.764,18	1.343,11	<b>20.943,21</b>
Marzo 2013	21.394,80	4.365,90	32.754,94	8.487,50	3.540,32	<b>70.543,46</b>
Abril 2013	13.944,50	999,43	12.983,59	0	867,96	<b>28.795,44</b>
Mayo 2013	7.411,25	0	7.236,35	0	647,35	<b>15.294,95</b>
Junio 2013	3.153,93	0	5.113,77	0	551,92	<b>8.819,59</b>
Julio 2013	3.512,75	26,23	3.680,64	0	372,34	<b>7.591,96</b>
Agosto 2013	2.099,91	0	1.454,11	0	168,29	<b>3.722,31</b>
Septiembre 2013	872,071	0	1.129,23	0	130,80	<b>2.132,14</b>
<b>2012-2013</b>	<b>78.736,5</b>	<b>6.833,56</b>	<b>104.466,22</b>	<b>11.219,80</b>	<b>11.048,69</b>	<b>212.304,78</b>



**Figura 5.** Variación de la masa de sales evacuadas en cada estación de bombeo de agua de drenaje y en el conjunto del Sector B-XII durante la campaña 2012-2013



Las estaciones Señuela I y Tarfia I evacuaron la mayor cantidad de sales durante la estación de lluvias, coincidiendo con el mayor volumen de agua bombeado, la mayor concentración de sales en el agua de drenaje. Todo ello en la época de mayores caudales del río Guadalquivir y mayor la capacidad de dilución de las sales aportadas. Durante el verano, cuando los caudales del río son menores, tanto el volumen de agua de drenaje como la cantidad de sales bombeadas al río son menores. Sin embargo, la salinidad del agua del río, en las salidas de las estaciones de bombeo, aumenta paulatinamente desde la situada más aguas arriba (Vetalengua) a la que lo está más aguas abajo (Los Yesos). La mayor concentración de sales en el agua se da durante los meses de junio a agosto y la menor de febrero a mayo con un mínimo en abril (Figura 6).

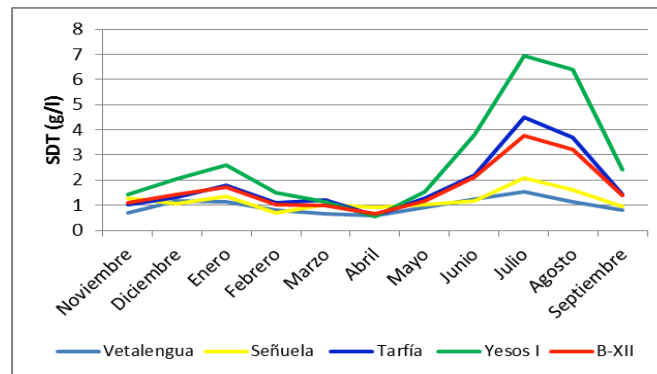


Figura 6. Variación de la salinidad del agua del río Guadalquivir a la salida de cada estación de bombeo de agua de drenaje durante la campaña 2012-2013

Durante las dos campañas estudiadas hay pocos datos de salinidad del agua del río para determinar el efecto de la evacuación de la masa de sales con el agua de drenaje. A mediados de septiembre de 2012, la *CE* del agua al inicio del tramo del río era 3,5 dS/m y al final 16,4 dS/m. En septiembre de 2013, los *SDT* al comienzo del tramo eran de 0,77 g/l y de 5,5 g/l al final. La observación de cierta estratificación en la salinidad del agua en este último punto los dos años indica que la influencia de la cuña salina de agua salobre podría tener más influencia en esta variación de la salinidad del agua que la evacuación de sales de este sector, ya que en septiembre la superficie regada es muy pequeña.

Respecto al **balance de nitratos** los datos disponibles de  $\text{NO}_3^-$  del agua de riego son de 2009: en mayo 9,4 mg/L y en junio-julio 7,4 mg/L. Para una dotación media de agua de riego en parcela estimada para la campaña 2012-2013 en 6.670 m<sup>3</sup>/ha y suponiendo una  $\text{NO}_3^-$  media de mayo a septiembre de 8 mg/L, la aportación media de nitratos con el agua de riego hubiera sido en dicha campaña de unos 53 kg/ha. En abril de 2013 la  $\text{NO}_3^-$  media de 8 muestras del agua de drenaje que llegaba a las estaciones de bombeo fue 84,9 mg/L con valores en el intervalo de 50 a 100 mg/L. El valor medio en julio de otras 8 muestras fue 77,9 mg/L.

Para un volumen medio de agua de drenaje evacuada durante la campaña 2012-2013 de 2.608 m<sup>3</sup>/ha y tomando una  $\text{NO}_3^-$  media de 80 mg/l, la cantidad media de nitratos evacuados con el agua de drenaje hubiera sido de unos 208 kg/ha. Estos resultados, aunque limitados, sí sirven para indicar que este sector exporta más nitratos con el agua de drenaje que los importados con el agua de riego. Es decir, hay un lavado de nitratos de los suelos, bien de los aportados en la fertilización nitrogenada de la campaña estudiada o de los acumulados en el suelo y en el subsuelo, procedentes de campañas anteriores.

Hay pocos datos de  $\text{NO}_3^-$  del agua del río Guadalquivir en la campaña 2012-2013: a mediados de septiembre de 2012, la  $\text{NO}_3^-$  era al inicio del tramo del río (6,9 mg/L) y al final (7,2 mg/L), cifras inferiores a la del agua en la presa de Alcalá (17,5 mg/L). Valores similares fueron determinados al comienzo de la campaña de 2013-2014 en octubre: respectivamente en los dos puntos mencionados anteriormente 6,9 y 7,7 mg/L.

## Efectos del riego y drenaje de las tierras sobre la capa freática

El riego y el drenaje de las tierras del sector han afectado al régimen de fluctuación de la capa freática. Los sistemas de drenaje subterráneo controlan ahora la posición del nivel freático. Solamente asciende este nivel a la superficie del terreno durante episodios de lluvias intensas, para descender por efecto del drenaje cuando la intensidad de éste supera a la percolación de agua. Una vez aplicado el riego por surcos o aspersión el nivel freático raramente alcanza la capa laborable. Tras el riego, parte del agua aplicada fluye directamente a la tubería a través de la zanja del dren. Lo más frecuente es que el nivel de agua se sitúe entre 30 y 65 cm de profundidad. El sistema de drenaje hace descender el nivel freático hasta una profundidad de unos 75-80 cm, justamente por encima del nivel de los drenes. En dos parcelas regadas por goteo, una con maíz y otra con tomate, el nivel freático permaneció a unos 60 cm de profundidad en julio de 2013.

Con el lavado de los suelos el agua freática también ha ido perdiendo sales, pero sigue siendo salina en contacto con el subsuelo todavía salino. Por ello, los sistemas de drenaje subterráneo seguirán evacuando sales, aunque las *CE* más altas del agua coinciden con caudales de drenaje inferiores a 0,1 mm/d.

No hay datos de  $\text{NO}_3^-$  del agua freática antes de la transformación en regadío, pero no tendrían que ser altos dado el entonces uso poco intensivo de la tierra. La menor  $\text{NO}_3^-$  determinada en las muestras de agua de 2013 fue 22 mg/l con nivel freático en la capa laborable y la mayor de 541 mg/l con el nivel situado a más de 65 cm de profundidad. Entre estos dos valores extremos la  $\text{NO}_3^-$  no solamente depende de la profundidad sino también del cultivo y de la fase de su ciclo relacionada con la práctica del abonado nitrogenado. Estas cifras indican un aumento de la  $\text{NO}_3^-$  en el agua subterránea de la capa de agua colgada por efecto de la agricultura de regadío.

## Conclusiones y recomendaciones sobre el uso del agua en el sector

El riego de los cultivos del sector y el drenaje del exceso de agua han sido imprescindibles para la transformación de las tierras de marisma en tierras de uso agrícola. Siguen siendo esenciales para la mejora progresiva de la calidad de los suelos regables pues eliminan progresivamente sales de la capa colgada de agua. La agricultura de regadío del sector es rentable económicamente y se mantiene permanentemente sin deterioro de sus suelos, que progresivamente van perdiendo sales.

La CR-BXII mantiene operativas eficazmente las redes principales de riego y drenaje así como las estaciones adaptando las necesidades de bombeo al consumo mínimo de electricidad. Los regantes aplican el agua con alta eficiencia. Es necesario que mantengan los sistemas de drenaje parcelarios en funcionamiento, con refinados periódicos de los bancales, conservando los tubos de salida de la escorrentía superficial de agua de lluvia a los desagües secundarios y evitando la entrada de raíces en el tramo final de los drenes subterráneos. También conservando la infiltración y permeabilidad del suelo introduciendo al menos cada tres años un cultivo de invierno-primavera con objeto de mantener seco el suelo en verano y practicar un subsolado a 50 cm cada aproximadamente 3 años.

Las dotaciones de agua suministradas a la CR-BXII por la CHG en las campañas de riego de 2011-2012 y 2012-2013 han sido inferiores a la dotación calculada para satisfacer las necesidades potenciales de agua de los cultivos y el control de la salinidad de los suelos. La detracción de agua del Guadalquivir está plenamente justificada para garantizar los beneficios socioeconómicos que resultan de la agricultura de regadío del sector. Todo ello, para un riego que actualmente es altamente eficiente e incluso posiblemente deficitario.

El manejo actual del agua evita que no se acumulen en las tierras las sales aportadas por el agua de riego. El lavado de sales del subsuelo es progresivo aunque lento y lo seguirá siendo por la reserva de sales que tiene el subsuelo, especialmente al nivel de los drenes y por debajo del mismo. La percolación actual de agua de riego es la mínima para el control

de la salinidad en la profundidad efectiva del suelo. Por ello, es recomendable mantener la actual eficiencia de riego. El sector evacua la mayor parte de las sales lavadas de sus suelos en la época de mayores caudales del río Guadalquivir, cuando la capacidad de dilución de las sales aportadas es mayor. La salinidad del agua del río Guadalquivir en el tramo asociado al sector B-XII depende más del caudal del río y su efecto en la cuña salina que de la evacuación de sales con el agua de drenaje de este sector.

La masa de nitratos evacuada con el agua de drenaje en la campaña estudiada supera a la masa importada con el agua de riego. El agua de la capa colgada es más rica en nitratos que el agua de riego. Es posible que el abonado actual se adapte a las necesidades de fertilización de los cultivos y que se estén eliminando nitratos acumulados en campañas anteriores, pero esta suposición necesita ser confirmada con un estudio detallado del balance de nitratos en este sector.

Es **recomendable** determinar las necesidades de agua de los cultivos más relevantes del sector con los datos de la  $ET_0$  de la estación Lebrija I y revisando los coeficientes  $k_c$ . Asimismo, estudiar la productividad del agua para determinar la dotación de agua más adecuada, con datos de las campañas de riego posteriores a la considerada en este estudio. Tanto para campañas con suministro normal de agua de riego como para riego deficitario en caso de sequías. También estudiar la fertilización nitrogenada de los cultivos determinando las necesidades de abonado y considerando el aporte de nitratos con el agua de riego, de forma que el balance de nitratos en este sector sea equilibrado, con objeto de reducir paulatinamente la masa de nitratos a evacuar con el agua de drenaje bombeada al río Guadalquivir. Además incluir los nitratos en el programa actual de la CR-BXII que determina la salinidad del agua de drenaje que llega a las estaciones de bombeo. Si los agricultores logran equilibrar el balance de nitratos, el exceso almacenado en el subsuelo se irá eliminando gradualmente como ocurre con la salinidad.

Para confirmar las conclusiones de este estudio es también recomendable elaborar balances de agua, sales y nitratos en más campañas de riego, con objeto de obtener valores medios más representativos que los de una única campaña analizada en este estudio.

## **Agradecimientos**

A la DGA y al CEDEX por la oportunidad de llevar a cabo el estudio de referencia (2013). A Benito Bellido, ingeniero responsable de los servicios técnicos de la CR-BXII, por su información permanente sin la que hubiera sido imposible llevar a cabo este trabajo. A Julia Espina Argüello, de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, por los datos de calidad del agua del Bajo Guadalquivir proporcionados.

## **Referencias bibliográficas**

- Boussinesq (1904). Recherches théoriques sur l'écoulement des nappes d'eau infiltrées dans le sol et sur le dé des sources. Journal des Mathématiques Pures et Appliqués 10-1-78.
- CR-BXII (2009). Documentación técnica para la inscripción en el registro de aguas del aprovechamiento de la Comunidad de Regantes del Sector B-XII del Bajo Guadalquivir. DGA/CEDEX (2012). Anuario de aforos 2009-2010. Confederaciones Hidrográficas. Dirección General del Agua y CEDEX, Madrid.
- DGA/CEDEX (2013). Gestión sostenible del agua de riego en zonas de presiones significativas (detracción/contaminación) sobre masas de agua; estudio de 3 zonas piloto (85.000 ha). Actuación nº 22 de la Asistencia Técnica, Investigación y Desarrollo Tecnológico en Materias de Competencia de la Dirección General del Agua (2007-2011).
- Grande Covián, R. (1956). Los suelos salinos; su rescate y aplicación a las Marismas del Guadalquivir. Publicaciones del Ministerio de Agricultura, Madrid.
- Grande Covián, R. (1967). Las Marismas del Guadalquivir y su rescate. Serie de Estudios del Instituto Nacional de Colonización, volumen V 29, Madrid.



- INC (1970). Estudio de Reconocimiento de Suelos de la Sección III de Marismas del Guadalquivir, Sevilla. Servicio de Suelos del Instituto Nacional de Colonización, Madrid.
- IRYDA (1984). Evaluación de los sistemas de drenaje de las Marismas del Guadalquivir. Instituto Nacional de Reforma y Desarrollo Agrario, Madrid.
- Lampe, U. (1998). Influence of Irrigation and Drainage on Water and Salt Dynamics in Reclaimed Heavy Clay Soils of the Guadalquivir Marshlands, South Spain. Diplomarbeit and der Technischen Universität Carolo Wilhelmina zu Braunschweig. Alemania.
- Martínez Beltrán, J. (1988). Drainage criteria for heavy soils with a shallow impervious layer. *Agricultural Water Management*, 14, 91-96.
- Vázquez Guzmán, A. (1999). Saneamiento y drenaje: construcción y mecanización. Editorial Agrícola Española. Madrid.

## **GRUPOS TEMAS “C”**

# **INGENIERÍA Y MODERNIZACIÓN DEL RIEGO**

---

Equipos, materiales, instrumentación, etc. Métodos de riego y respuesta de los cultivos. Explotación, mantenimiento, modernización y rehabilitación de los sistemas de riego y drenaje. Ahorro de agua, energía y otros insumos. Reducción de costes de explotación. Programación de la red de riego. Modelos matemáticos. Utilización de fuentes alternativas de energía en riegos a presión. Proyectos de ingeniería de riego, experiencias y enseñanzas adquiridas de su ejecución. Aplicación práctica de técnicas experimentadas.





## EVALUACIÓN DE LA UNIFORMIDAD DE DISTRIBUCIÓN EN CAMPO EN RIEGO POR GOTEO CON AGUAS REGENERADAS: COMPARACIÓN Y PROPUESTA DE UN NUEVO MÉTODO

*Duran-Ros, M. (1); Arbat, G. (2); Pujol, J. (3); Barragán, J (4).; Ramírez de Cartagena, F. (5) (P); Puig-Bargués, J. (6)*

<sup>1</sup> Profesor Lector, Universidad de Girona, Departamento de Ingeniería Química, Agraria y Tecnología Agroalimentaria, [miquel.duranros@udg.edu](mailto:miquel.duranros@udg.edu)

<sup>2</sup> Profesor Lector, Universidad de Girona, Departamento de Ingeniería Química, Agraria y Tecnología Agroalimentaria, [gerard.arbat@udg.edu](mailto:gerard.arbat@udg.edu)

<sup>3</sup> Profesor Colaborador Permanente, Universidad de Girona, Departamento de Ingeniería Química, Agraria y Tecnología Agroalimentaria, [joan.pujol@udg.edu](mailto:joan.pujol@udg.edu)

<sup>4</sup> Catedrático Emérito, Universidad de Lleida, Departamento de Ingeniería Agroforestal, [barragan@eagrof.udl.es](mailto:barragan@eagrof.udl.es)

<sup>5</sup> Profesor Titular de Universidad, Universidad de Girona, Departamento de Ingeniería Química, Agraria y Tecnología Agroalimentaria, [francisco.ramirez@udg.edu](mailto:francisco.ramirez@udg.edu)

<sup>6</sup> Profesor Titular de Universidad, Universidad de Girona, Departamento de Ingeniería Química, Agraria y Tecnología Agroalimentaria, [jaume.puig@udg.edu](mailto:jaume.puig@udg.edu)

### Resumen

La uniformidad de distribución de caudales es una medida de evaluación de los sistemas de riego por goteo. Existen distintos métodos de evaluación de campo descritos para su determinación, entre los cuales destacan los de Merriam y Keller (1978), ASAE (1998) y Burt (2004). La principal diferencia entre estos métodos está en la localización y cantidad de emisores que se utilizan para el cálculo de la uniformidad. En la situación actual de aumento de la utilización de tecnologías de precisión, se propone una alternativa a los métodos existentes consistente en la utilización de registros de caudal y presión proporcionados por distintos medidores instalados en la subunidad de riego, permitiendo estimar la uniformidad de distribución de caudales en tiempo real y sin necesidad de utilización de mano de obra para esta laboriosa tarea. La nueva metodología permitiría, además, evaluar instalaciones de goteo enterrado que de otra manera sería complicado de medir frecuentemente. La evolución de los resultados obtenidos en función de las horas de riego con el método presentado es más parecida a la que se consigue con el método de Burt (2004) que a la obtenida con el método de Merriam y Keller (1978).

### Abstract

Flow distribution uniformity is a parameter used for micro-irrigation evaluation. Different methods describe how to collect data and to calculate the distribution uniformity, such as the procedures developed by Merriam and Keller (1978), ASAE (1998) and Burt (2004). The main difference between these methods is the number and location of the drip emitters used for calculating the distribution uniformity. Nowadays, with increasing use of precision technologies, an alternative method is proposed to estimate distribution uniformity in real time and without using the manpower required by this time-consuming task. This method consists in using flow and pressure data collected by the devices installed in the drip irrigation unit. The proposed procedure will also allow to evaluate subsurface drip irrigation

systems, which distribution uniformity otherwise would be very difficult to determine frequently. The evolution of the results obtained by the proposed method according to the irrigation time is more similar with that obtained by Burt's (2004) method than that obtained following Merriam and Keller's (1978) method.

## 1- Introducción. Objetivo del trabajo

La uniformidad de distribución de caudales ( $UD_q$ ) es uno de los criterios más utilizados para el diseño y evaluación de instalaciones de riego por goteo (Barragán et al., 2006). Cuando este parámetro se utiliza para la evaluación, permite conocer si existen diferencias importantes en la aplicación del agua al cultivo y determinar las causas que las provocan para, de esta forma, poder reducir las y poder mantener el funcionamiento de la instalación tan cerca como sea posible de las condiciones establecidas en el diseño original (Wu et al., 2007)

La  $UD_q$ , que depende principalmente del diseño hidráulico, el coeficiente de variación de fabricación y la obturación de los emisores (Barragán et al., 2006), es un buen indicador de la obturación cuando se utiliza en la evaluación de los sistemas de riego por goteo siempre que en la instalación evaluada el diseño hidráulico sea el adecuado y el coeficiente de variación de fabricación de los goteros sea muy bajo. De esta forma, evaluar la  $UD_q$  es especialmente interesante cuando se utilizan aguas de riego con un potencial elevado de obturación, como es el caso de las aguas residuales regeneradas. Cabe comentar que el uso de aguas regeneradas en la agricultura es una alternativa viable en zonas donde ésta es escasa o hay competencia por el uso y que, el riego por goteo es un sistema de riego adecuado desde el punto de vista de salud pública y medioambiental (Bucks et al., 1979).

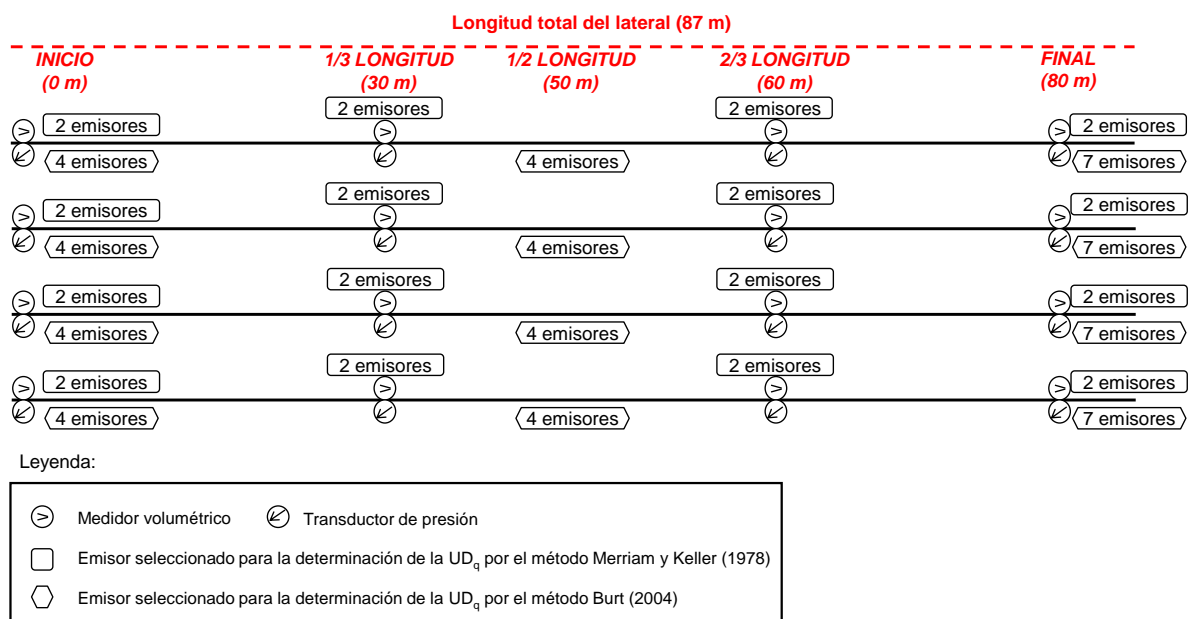
Entre los métodos existentes para la determinación de la  $UD_q$  en campo destacan los de Merriam y Keller (1978), adaptado por Vermeiren y Jobling (1986), ASAE (1998) o el de Burt (2004). Las diferencias entre ellos estriban básicamente en el número y localización de los goteros que se utilizan para determinar su descarga y presión de trabajo. Los dos métodos merecen comentarios críticos, estando entre los más destacados la idoneidad en la localización de los emisores que se muestrean en campo en el método de Merriam y Keller (1978) para la obtención de la media del caudal emitido de todos los goteros de la unidad y de su varianza (Juana et al., 2007). Es también un inconveniente de estos métodos de evaluación el hecho que ésta se realiza en la parcela y representa unos costos de mano de obra por tratarse de una tarea laboriosa.

En el presente trabajo se propone un nuevo método que facilita la determinación de la  $UD_q$ , y se comparan los resultados obtenidos con los procedentes de la aplicación de los métodos de Merriam y Keller (1978) y de Burt (2004). El método propuesto permite monitorizar la  $UD_q$  sin la necesidad de realizar el muestro en campo.

## 2- Materiales y métodos

Los experimentos se realizaron con una subunidad de riego por goteo en superficie que tenía 4 laterales de 87 m de longitud y goteros autocompensantes integrados de 1,6 l/h con coeficiente de variación de fabricación inferior al 3% situados cada 30 cm. La subunidad disponía de un cabezal de filtración que permitió operar con filtros de anillas, malla y arena, sucesivamente. La subunidad utilizaba como agua de riego el efluente suministrado por la Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) de Celrà (Girona). El ensayo duró 4500 h y los laterales se reemplazaron por otros nuevos cada 2000 h de funcionamiento.

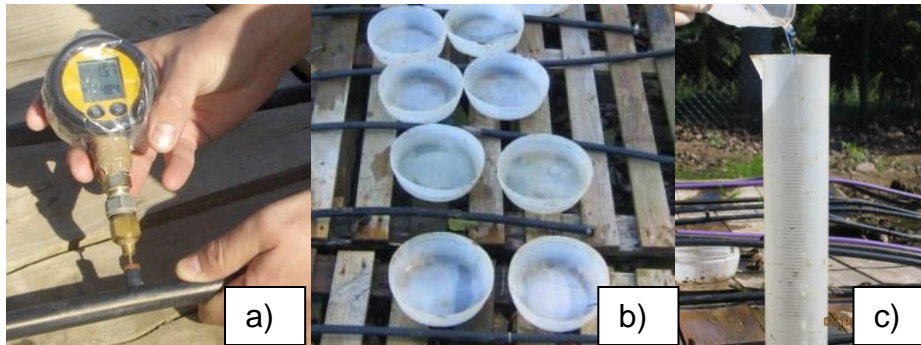
Se realizaron 13 evaluaciones del sistema de riego que requirieron la recogida manual de datos de caudales y presiones en la parcela de riego. Estas determinaciones se realizaron aproximadamente cada 500 h de riego y siguieron los métodos de Merriam y Keller (1978) y de Burt (2004). El método de la ASAE no se utilizó puesto que requiere aleatoriedad en la elección de los goteros y, precisamente, se quería utilizar siempre los mismos goteros en las evaluaciones para poder analizar con detalle el efecto de su posible obturación. Con el método de Merriam y Keller (1978), adaptado por Vermeiren y Jobling (1986), se determinó el caudal en 2 goteros contiguos localizados al inicio, a 1/3, a 2/3 de la longitud total y al final de los cuatro laterales, adoptando como caudal representativo de cada localización el caudal medio de los 2 goteros. El método de Burt (2004) requirió determinar los caudales en 4 goteros adyacentes del inicio de cada lateral, otros 4 goteros contiguos localizados en la mitad de los laterales y en los últimos 7 emisores de cada lateral (ver **Figura 1**).



**Figura 1.** Localización de los goteros según el método de evaluación de campo y localización de los medidores en continuo de volumen y presión.

La situación exacta desde la tubería terciaria de los medidores de volumen se observa en rojo en la **Figura 1**. Se decidió colocar el contador volumétrico del final del lateral a 7 metros del mismo en lugar del extremo final, para garantizar que el volumen medido fuera suficientemente alto para entrar dentro del rango de lectura del equipo.

Con los dos métodos de evaluación con recogida de datos manual, se midió la presión de trabajo de los goteros utilizando una toma de presión (Ein-Tal, Or-Akiva, Israel) y un manómetro digital modelo Leo 2 (Keller, Wintertur, Suiza) con un adaptador de aguja. Este manómetro tenía un error máximo de 0.065 % de la lectura según el certificado de calibración emitido por el fabricante. El caudal de los emisores se determinó recogiendo el volumen emitido por cada uno de ellos durante 5 minutos en un recipiente de plástico de 5 cm de alto y 20 cm de diámetro (**Figura 2**). El volumen recogido estuvo comprendido entre 100 y 250 ml tal y como se recomienda en el método de Merriam y Keller (1978).



**Figura 2.** Manómetro digital con adaptador de aguja y toma de presión en un lateral de goteo (a) y proceso de recogida del volumen emitido por los emisores en las pruebas de uniformidad de distribución de caudales (b y c).

Con todos los datos de las evaluaciones de campo, se calculó la  $UD_q$  y la uniformidad de distribución de presiones ( $UD_p$ ) con las ecuaciones (1) y (2), respectivamente, descritas en el método de Merriam y Keller (1978):

$$UD_q = \frac{q_{25}}{\bar{q}} \cdot 100 \quad (1)$$

donde:  $UD_q$  es la uniformidad de distribución de caudales (%)  
 $q_{25}$  es el caudal medio del 25% de las localizaciones con un menor caudal (l/h), por lo que es la media de las 4 localizaciones con caudal representativo más bajo  
 $\bar{q}$  es el caudal medio de todas las posiciones muestreadas (l/h), por lo tanto, es la media de los 16 caudales representativos

$$UD_p = \left( \frac{p_{25}}{\bar{p}} \right)^x \cdot 100 \quad (2)$$

donde:  $UD_p$  es la uniformidad de distribución de presiones (%)  
 $p_{25}$  es la presión media del 25% de las localizaciones con una menor presión (kPa). Así, es la media de las 4 presiones más bajas de las 16 localizaciones  
 $\bar{p}$  es la presión media de todas las localizaciones muestreadas (kPa), de forma que es la media de las 16 localizaciones  
 $x$  es coeficiente de descarga de la ecuación característica del gotero

En el método de Burt (2004) la uniformidad de distribución de caudales se calcula según la ecuación:

$$UD_p = 1 - \frac{1}{\sqrt{n}} \left( 1 - \text{media} \frac{q_{\min}}{q_{\text{media}}} \right) \quad (3)$$

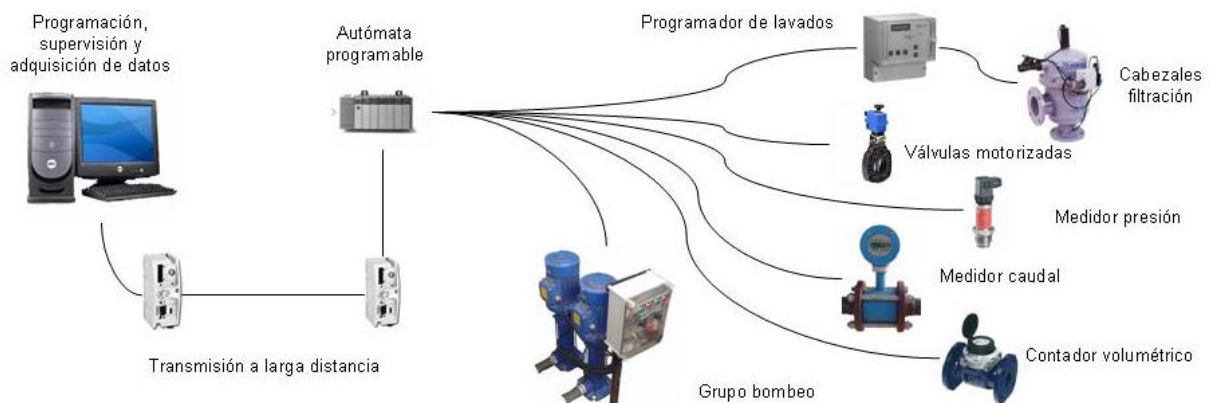
donde:  $n$  es el número de emisores por planta, adoptándose el valor 1 ya que no había plantas en el experimento

el término media  $\frac{q_{\min}}{q_{\text{media}}}$  se calcula con la ecuación (4)

$$\text{media } \frac{q_{\min}}{q_{\text{media}}} = \frac{\sum_1^3 \frac{q_{\min}}{q_{\text{media}}}}{3} \quad (4)$$

donde:  $q_{\min}$ , para cada una de las tres localizaciones, es la media del 25% de los goteros con un caudal inferior, por lo que es la media de 4 o 7 caudales, según si la localización es al inicio y mitad o final del lateral, respectivamente  
 $q_{\text{media}}$ , para cada una de las tres localizaciones, es la media de todos los caudales medidos. Así, es el caudal medio de 16 o 28 medidas, según si la localización es al inicio y mitad o final del lateral, respectivamente

La uniformidad de distribución de caudales obtenida con el método propuesto se obtuvo a partir de los registros proporcionados cada minuto por un sistema de supervisión y adquisición de datos (SCADA) instalado en la subunidad de riego (Duran-Ros et al., 2008) (**Figura 3**). Se utilizaron los datos de los transductores de presión DMP 331 P (DB Sensors, Thierstein, Alemania) con una precisión de medida de 0.175 % y de los contadores volumétricos 405 S DN 15 (Sensus, Raleigh, EE.UU) con una precisión del 1%, localizados al inicio, a 1/3 y a 2/3 de su longitud y a 7 m del final de cada lateral tal como se ha presentado en la **Figura 1**. Para poder comparar los resultados de  $UD_q$  obtenidos con el método de evaluación propuesto con las  $UD_q$  obtenidas con los métodos de evaluación de campo (Merriam y Keller (1978) y Burt (2004)), se utilizaron los datos recogidos por el SCADA durante los mismos instantes en los que se realizaron las evaluaciones de campo.



**Figura 3.** Esquema de los equipos que constituyen el sistema SCADA (sistema de supervisión, control, y adquisición de datos) implantado en la parcela experimental de riego.

A continuación se describe el procedimiento seguido para la determinación de la  $UD_q$  con el nuevo método propuesto. Se seleccionaron los volúmenes registrados para los mismos tiempos en que se practicó la evaluación de campo, determinándose a partir de estos valores los caudales estimados para cada localización y lateral. Es preciso comentar que el caudal de las localizaciones inicial y 1/3 y 2/3 de la longitud del lateral representaba el caudal de todos los emisores del lateral desde el punto de medición hasta el final (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Por este motivo, para la estimación del



caudal del tramo, se restó de estas localizaciones los caudales de los tramos posteriores según las ecuaciones (6), (7) y (8).

$$q_{\text{final}} = Q_{\text{final}} \quad (5)$$

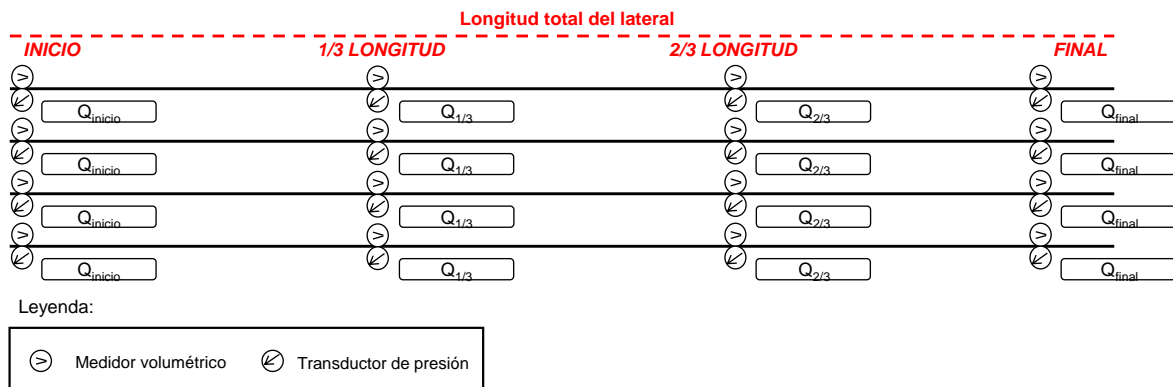
$$q_{2/3} = Q_{2/3} - Q_{\text{final}} \quad (6)$$

$$q_{1/3} = Q_{1/3} - Q_{2/3} \quad (7)$$

$$q_{\text{inicio}} = Q_{\text{inicio}} - Q_{1/3} \quad (8)$$

siendo:

- $Q_{\text{inicio}}$  el caudal estimado en la localización inicio del lateral
- $Q_{1/3}$  el caudal estimado en la localización 1/3 de la longitud del lateral
- $Q_{2/3}$  el caudal estimado en la localización 2/3 de la longitud del lateral
- $Q_{\text{final}}$  el caudal estimado en la localización final del lateral
- $q_{\text{inicio}}$  el caudal estimado en el tramo comprendido entre el inicio y la localización 1/3 de la longitud del lateral
- $q_{1/3}$  el caudal estimado en el tramo comprendido entre la localización 1/3 y 2/3 de la longitud del lateral
- $q_{2/3}$  el caudal estimado en el tramo comprendido entre la localización 2/3 de la longitud y el final del lateral
- $q_{\text{final}}$  el caudal estimado en el tramo final del lateral



**Figura 4.** Localización de las mediciones con registro en continuo en los laterales de riego monitorizados.

Posteriormente, se dividió el caudal estimado para cada uno de los tramos por el número real de emisores del tramo, de manera que se obtuvo el caudal medio de los goteros para cada uno de los tramos del lateral. Finalmente, utilizando la ecuación (1), se obtuvo un valor de la  $UD_q$  relacionando la media del 25 % de los emisores con menores caudales estimados y la media de los caudales estimados.

### 3- Resultados y discusión

La  $UD_p$  estuvo siempre por encima del 97% y con un valor promedio para todas las medidas de 98.3%, lo que es indicativo de que el sistema estaba correctamente diseñado y operaba adecuadamente.

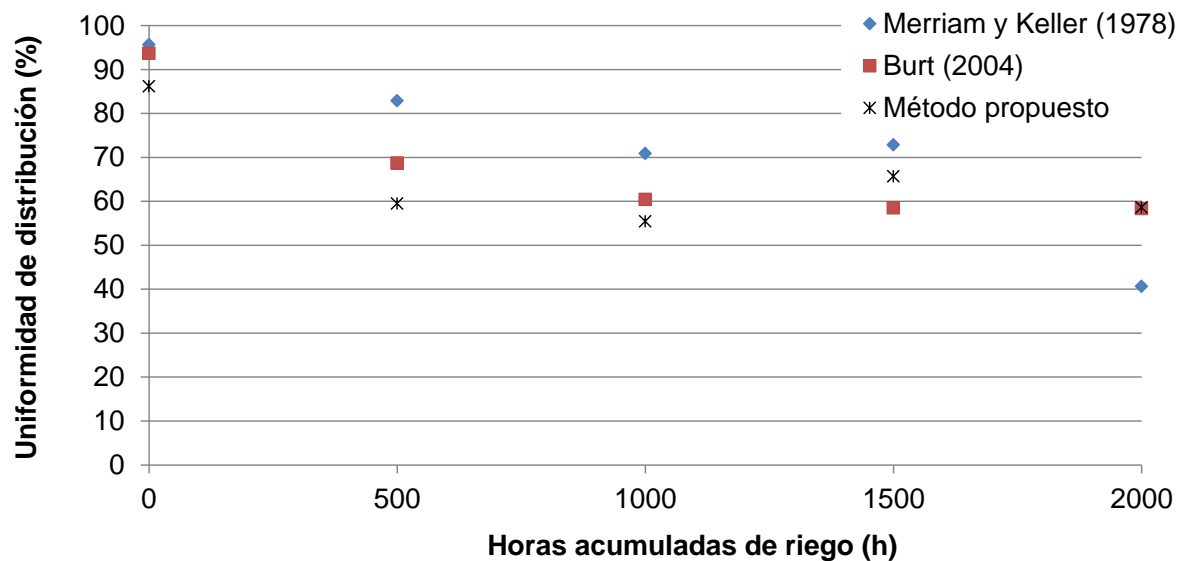
Los resultados de la  $UD_q$  para las 13 evaluaciones realizadas se indican en la **tabla 2**.

**Tabla 1.** Comparación entre las  $UD_q$  (%) obtenidos con los distintos métodos de evaluación.

Evaluación	Merriam y Keller (1978)	Burt (2004)	Método propuesto
1	96,30	94,24	89,13
2	81,31	71,84	49,39
3	90,91	86,06	66,38
4	71,81	62,49	74,55
5	75,16	58,85	60,73
6	68,41	58,25	61,48
7	95,50	95,78	90,80
8	71,01	50,71	38,76
9	69,96	58,37	36,38
10	70,59	58,20	70,60
11	12,90	58,41	55,80
12	95,09	91,07	78,66
13	88,25	66,12	83,34

Los valores de la  $UD_q$  obtenidos aplicando cada uno de los métodos han resultado distintos. Se atribuye esta discrepancia a que tanto el método de Merriam y Keller (1978) como el de Burt (2004) sólo miden el caudal de algunos emisores, mientras que el método propuesto determina, de forma indirecta, el caudal de todos los goteros de la instalación. Esto concuerda con Juana et al. (2007) quienes cuestionaron si con la selección de las localizaciones en el método de Merriam y Keller (1978), se podía asumir la media de caudales muestreados como la media de caudales de toda la unidad de riego. A partir de los valores obtenidos con el método propuesto no se puede inferir el valor de la  $UD_q$  que se obtendría utilizando el método de Merriam y Keller (1978) ni el de Burt (2004) ya que el coeficiente de correlación fue de 0.24 y 0.48 respectivamente, siendo ambos valores muy bajos. Sin embargo, se obtuvo una buena correlación entre los valores obtenidos con los métodos de Merriam y Keller (1978) y Burt (2004) ( $R^2=0.87$ ), explicable por las semejanzas entre los métodos por lo que se refiere a la localización de los goteros que se muestrean.

En la **Figura 5** se presenta la evolución de la  $UD_q$  en función de las horas de riego acumuladas para cada método de medición,



**Figura 5 .** Evolución de la  $UD_q$  en función de las horas de riego y el método de evaluación utilizado.

El método de Merriam y Keller (1978) penaliza en gran medida los emisores completamente obturados del final del lateral ya que utiliza los dos últimos emisores del mismo. Diversos autores han constatado que es más probable encontrar emisores completamente obturados al final de los laterales de riego, especialmente cuando se utilizan aguas regeneradas (Duran-Ros et al., 2009; Ravina et al. 1992, 1997; Trooien et al. 2000) debido a que con el menor caudal que circula por esta zona hay una mayor cantidad de deposiciones (Ravina et al. 1992, Trooien et al. 2000; Hills et al. 2000). En las evaluaciones en las que se obtuvo menor  $UD_q$  según el método de Merriam y Keller (1978) se registraron los mayores números de emisores completamente obturados, lo que se observa (**Figura 5**) con una caída de la  $UD_q$  hasta el 40 % que se produce al llegar a las 2000 h de funcionamiento. El método de Burt (2004) no penaliza tanto sobre el valor de la  $UD_q$  por la presencia de goteros completamente obturados del final del lateral, ya que en la localización del final del lateral se miden 7 emisores por lateral y no únicamente los 2 últimos.

El método propuesto, presenta (**Figura 5**) unos valores parecidos a los determinados con el método de Burt (2004) pero con la ventaja que se evita la realización de las medidas discretas y manuales en campo de caudal y presión. El método propuesto permite además, obtener valores de  $UD_q$  de sistemas de riego por goteo enterrado sin tener que desenterrar los laterales de riego. Sin embargo, la nueva metodología presentada requiere una mayor tecnificación de la instalación, con la implementación de medidores de volumen y presión en las localizaciones estratégicas y equipos para registrar los datos. Con este sistema se puede controlar en tiempo real y continuo el funcionamiento de las instalaciones de riego localizado. La metodología propuesta se enmarca dentro de las nuevas tecnologías del riego que permiten alcanzar mayores eficiencias en la utilización del agua (Ruíz-Canales y Ferrández-Villena, 2015).

## 7- Conclusiones y recomendaciones

Para la determinación de la  $UD_q$  se han comparado los métodos de Merriam y Keller (1978) y de Burt (2004) con un nuevo procedimiento desarrollado a partir del de Merriam y Keller midiendo el caudal y la presión en distintos puntos del lateral de riego en lugar de en determinados goteros. Existe una evolución temporal parecida de las  $UD_q$  con los tres



métodos, pero la presencia de obturaciones tiene mucha incidencia, especialmente en el método de Merriam y Keller (1978) puesto que solamente utiliza 2 goteros del final del lateral y es muy probable que se obturen después de largos períodos de utilización con aguas con potencial de atascamiento.

Los resultados indican la gran incidencia que tiene la obturación de los goteros en los valores de la  $UD_q$ . El método propuesto presenta como ventajas su automatización y que considera indirectamente todos los goteros del sistema, de forma que no se resulta tan afectado por la obturación de los goteros evaluados como sucede con el método de Merriam y Keller (1978), en mayor medida, y el de Burt (2004) y presenta también la posibilidad de evaluar instalaciones de riego por goteo enterrado que serían imposibles de evaluar sin desenterrar los laterales de riego.

## 8.- Agradecimientos

Los autores quieren agradecer al Ministerio de Economía y Competitividad la concesión de la ayuda para la realización del proyecto de investigación referencia CGL2012-31180. También agradecen a Regaber y al Ayuntamiento de Celrà (Girona) su ayuda en el desarrollo de las experiencias.

## 9- Bibliografía

- ASAE, 1998. ASAE Standards. ASAE, 2950 Niles Road, St Joseph, MI 49085-9659, USA.
- Barragán, J., Bralts, V. & Wu, I.P (2006). Assessment of Emission Uniformity for Micro-irrigation Design. *Biosystems Engineering*, 93 (1), 89-97.
- Bucks, D. A., Nakayama, F. S. & Gilbert, R. G. (1979). Trickle irrigation water quality and preventive maintenance. *Agricultural Water Management*, 2 (2), 149-162.
- Burt, C. (2004). Rapid field evaluation of drip and microspray distribution uniformity. *Irrigation and Drainage Systems*, 18, 275-297.
- Duran-Ros, M., Puig-Bargués, J., Arbat, G., Barragán, J. & Ramírez de Cartagena, F. (2008). Definition of a SCADA system for a microirrigation network with effluents. *Computers and Electronics in Agriculture*, 64 (2), 338-342.
- Duran-Ros, M., Puig-Bargués, J., Arbat, G., Barragán, J. & Ramírez de Cartagena, F. (2009). Effect of filter, emitter and location on clogging when using effluents. *Agricultural Water Management*, 96 (1), 67-79.
- Hills, D.J., Tajrishy, M.A. & Tchobanoglous, G. (2000). The influence of filtration on ultraviolet disinfection of secondary effluent for microirrigation. *Transactions of the ASAE* 43 (6), 1499–1505.
- Juana, L., Rodriguez-Sinobas, L., Sánchez, R. & Losada, A. (2007). Evaluation of drip irrigation: Selection of emitters and hydraulic characterization of trapezoidal units. *Agricultural Water Management*, 90, 13-26.
- Merriam, J. L. & Keller, J. (1978). *Farm irrigation evaluation: A guide for management*. Department of Agricultural and Irrigation Engineering, Utah State University, Logan, Utah.



- Ravina, I., Paz, E., Sofer, Z., Marcu, A., Shisha, A. & Sagi, G. (1992). Control of emitter clogging in drip irrigation with reclaimed wastewater. *Irrigation Science*. 13 (3) , 129–139.
- Ravina, I., Paz, E., Sofer, Z., Marcu, A., Shisha, A., Sagi, G., Yechialy, Z. & Lev, Y. (1997). Control of clogging in drip irrigation with stored treated municipal sewage effluent. *Agricultural Water Management*, 33 (2–3), 127–137
- Ruiz-Canales, A. & Ferrández-Villena, M. (2015) New proposals in the Automation and remote control of water management in agriculture: Agromotic Systems. *Agricultural Water Management*, 151, 1-3.
- Trooien, T.P., Lamm, F.R., Stone, L.R., Alam, M., Rogers, D.H., Clark, G.A. & Schlegel, A.J., (2000). Subsurface drip irrigation using livestock wastewater: dripline flow rates. *Applied Engineering. Agriculture*, 16 (5), 505–508.
- Vermeiren, L. & Jobling, G. A. (1986). Riego localizado. Riego y Drenaje, 36. FAO, Roma.
- Wu, I-P., Barragán, J. & Bralts, V. (2007). Field performance and evaluation. En: Lamm, F.R., Ayars, J.E. & Nakayama, F.S. (Eds.) *Microirrigation for crop production. Design, Operation, and Management* (357-388). Amsterdam. Elsevier.





# VOLUMEN ÓPTIMO DE Balsa EN REDES COLECTIVAS DE RIEGO A LA DEMANDA. CASO DE ESTUDIO CULTIVO DE VIÑA EN ESPAÑA

*Izquier A.<sup>1</sup>; Moreno M. A.<sup>2</sup>; Tarjuelo J. M.<sup>3</sup>;*

<sup>1</sup> Personal Investigador, Doctorando, Centro Regional de Estudios del Agua (CREA), Universidad de Castilla-La Mancha, Ctra. de Las Peñas km. 3.4, 02071 Albacete, [Argenis.Izquier@alu.uclm.es](mailto:Argenis.Izquier@alu.uclm.es)

<sup>2</sup> Profesor Contratado Doctor, Centro Regional de Estudios del Agua (CREA), Universidad de Castilla-La Mancha, Ctra. de Las Peñas km. 3.4, 02071 Albacete, [Miguelangel.Moreno@uclm.es](mailto:Miguelangel.Moreno@uclm.es)

<sup>3</sup> Profesor Titular de Universidad, Centro Regional de Estudios del Agua (CREA), Universidad de Castilla-La Mancha, Ctra. de Las Peñas km. 3.4, 02071 Albacete, [Jose.Tarjuelo@uclm.es](mailto:Jose.Tarjuelo@uclm.es)

## Resumen

Se ha desarrollado la herramienta DRODN (Design of Reservoir On Demand Network) (implementada en MATLAB) con un enfoque holístico para determinar en una red colectiva de riego a la demanda el mínimo coste total ( $C_T$ ) (incluyendo los costes de inversión ( $C_i$ ), operación ( $C_e$ ) y mantenimiento ( $C_m$ )). El procedimiento determina el volumen óptimo de la balsa de almacenamiento y regulación intermedia teniendo en cuenta las tarifas eléctricas y la disponibilidad de agua en el sondeo, la evolución de la demanda de agua de la red a lo largo de la campaña de riegos utilizando el método de curvas aleatorias de demanda diaria (Random daily demand curve) (RDDC). La herramienta se ha aplicado a una red de riego de 171 ha, que riega por goteo viña y olivar, localizada en la provincia de Cuenca (España). Los resultados indican que el volumen óptimo de almacenamiento y regulación está alrededor de los 5 000 m<sup>3</sup>, y el  $C_T$  para ND = 100 m es 325 € ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. El  $C_e$  es el principal componente del  $C_T$ , representando más del 63% en los casos estudiados. La forma de operación y manejo de la red de riego condiciona las dimensiones de la balsa y los costes anuales de suministro.

## 1- Introducción y Objetivos

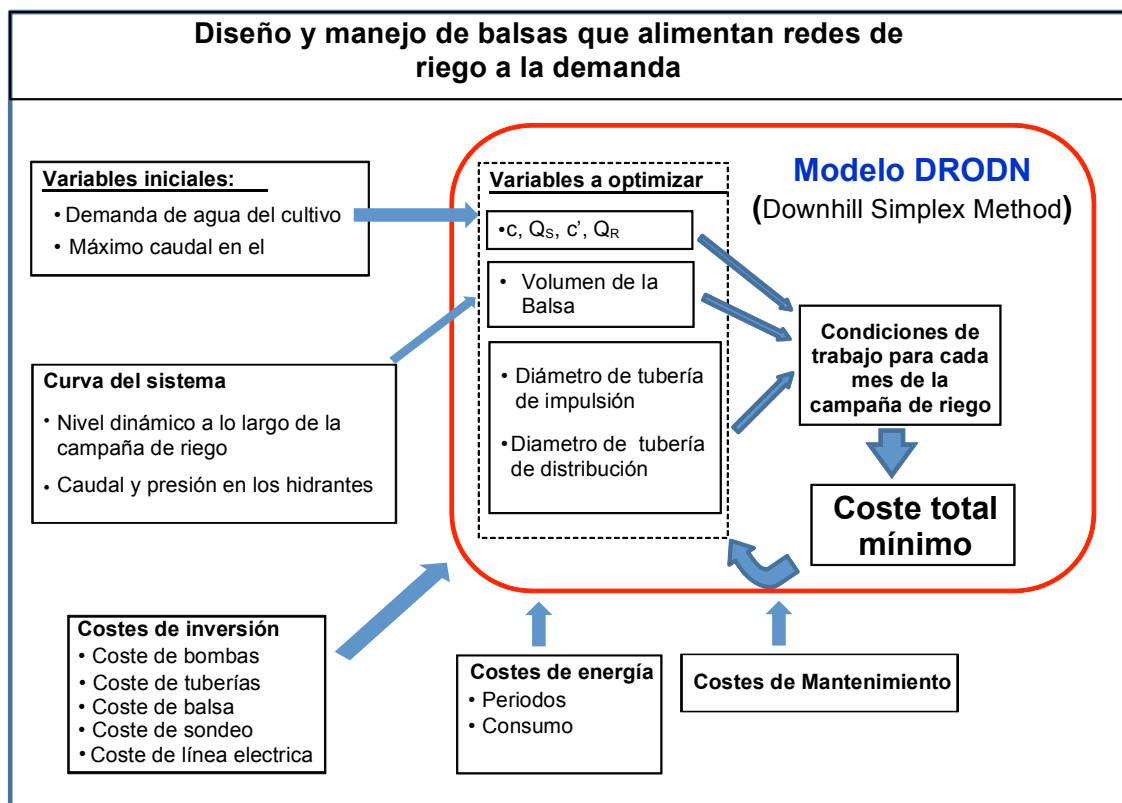
En países como España, donde el coste de la energía eléctrica está experimentando un gran incremento (más de un 100% desde 2008), unido a la gran dependencia energética de sus regadíos al tener más del 70% de los 3,4 millones de hectáreas regadas con riego a presión (48% de riego localizado y 22% de aspersión) (ESYRCE, 2011), y a la cada vez menor disponibilidad de agua para riego por incremento de las necesidades urbanas y medioambientales, resulta imprescindible desarrollar herramientas y modelos que ayuden a mejorar la eficiencia en el uso del agua y la energía en el regadío (Pulido-Calvo y Gutiérrez-Estrada, 2011; Moreno *et al.*, 2012). Las balsas de almacenamiento y regulación, situadas entre la fuente de agua y el sistema de riego, es una opción que permite regular el caudal bombeado y el momento de consumo de energía, buscando reducir los costes energéticos (Nel y Haarhoff, 1996; Hirose, 1997). La procedencia del agua utilizada para riego en regiones como la Mancha Oriental es 92% de sondeos, 6% de ríos o manantiales y 2%

mixtos (JCRMO, 2012); ésa necesidad de extraer agua a profundidades entre 50 y 200 m, obliga a disponer de herramientas de ayuda a la toma de decisiones para el adecuado manejo del agua y de la energía. El objetivo de este trabajo es desarrollar un modelo de optimización denominado DRODN (Design of regulating Reservoir On-Demand irrigation Networks) con un enfoque holístico para encontrar el mínimo coste ( $C_T$ ) de entrega de agua a la cabecera de una red de riego a la demanda, teniendo en cuenta la variabilidad de presión y caudal en la red durante la campaña de riegos. El modelo contempla la utilización de una balsa intermedia para buscar el mínimo  $C_T$ , incluyendo la inversión, la energía y el mantenimiento necesarios en el proceso de extracción y entrega de agua en cabecera de la red de riego. El trabajo analiza el nivel dinámico de bombeo (ND) sobre el  $C_T$ , determinando los caudales óptimos de bombeo y rebombeo, y la capacidad de la balsa que conducen al  $C_T$  mínimo. La herramienta se ha aplicado a una red de riego por goteo, y con agua procedente del acuífero Mancha Oriental, en la provincia de Cuenca (España).

## 2- Materiales y Métodos

### 2.1- Optimización de la alimentación a una red de riego a la demanda

Considerando el proceso de extracción y suministro de agua a una red colectiva en su conjunto, se ha desarrollado el modelo **DRODN** (Figura 1) con un enfoque holístico para minimiza el coste total anual de aplicación del agua de riego ( $C_T$ , en  $\text{€ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ), como suma de los costes de inversión ( $C_i$ ), energía ( $C_e$ ) y mantenimiento ( $C_m$ ). Los costes de inversión incluyen el sondeo, la línea eléctrica, las bombas, la red de tuberías en la impulsión y distribución hasta la cabecera de la red.



**Figure 1.** Esquema del proceso de optimización para minimizar los costes totales de aplicación de agua ( $C_T$ ) en redes de riego a la demanda.

Las variables a optimizar fueron: a) el caudal bombeado desde el sondeo a la balsa ( $Q_S$ ) y el de rebombeo desde la balsa hasta la red de riego ( $Q_R$ ); b) los coeficientes de la curva característica de la bomba en el sondeo ( $c$ ) y en el rebombeo ( $c'$ ) que determinan la forma óptima; c) los diámetros de las tuberías de impulsión ( $D_i$ ) y de las tuberías de distribución ( $D_d$ ); y d) las dimensiones de la balsa de regulación de acuerdo con el volumen óptimo de la balsa ( $V_T$ ). El proceso de optimización se llevó a cabo mediante el método Downhill Simplex Method (Nelder y Mead, 1965) con el objetivo de minimizar los costes totales (ecuación 1):

$$\text{MIN } C_T = C_i + C_e + C_m \quad (1)$$

donde  $C_i$  = coste anual de inversión,  $C_e$  = coste anuales de operación, el cual incluye los costes energéticos y  $C_m$  = coste anual de mantenimiento.

Los datos que alimentan el modelo son: el consumo de agua de los cultivos ( $N_n$ ), el nivel dinámico (ND) del agua en el sondeo, la presión necesaria a la entrada de la red ( $P_o$ ), máximo caudal a extraer del sondeo ( $Q_o$ ), los precios de la energía eléctrica ( $P_e$ ), los precios de los equipos y elementos de las instalaciones hasta la cabecera de la red de riego.

## 2.2- Descripción del caso de aplicación del modelo

El estudio se llevó a cabo en una red de riego por goteo a la demanda de 171 ha para riego de viña (80%) y olivar (20%), localizada en la Grajuela, provincia de Cuenca (España). El agua procede de un sondeo de 135 m de profundidad, nivel dinámico de 110 m, y es extraída por una bomba de 296 HP, con un caudal teórico de  $130 \text{ l s}^{-1}$ , y almacenada en una balsa de  $20\,000 \text{ m}^3$  (de tronco piramidal invertida) desde donde se rebombee a la red de riego. Las bombas son controladas por un PCL (controlador lógico programable), para mantener una presión en la cabecera de la red de 45 m y garantizar una presión en hidrante de 25 m.

## 2.3- Métodos para estimar la demanda de agua de la red

Para obtener el volumen de la balsa que regule la máxima demanda de agua de los cultivos durante los 10 días del periodo de consumo punta la optimización se realiza por etapas. En una primera etapa se aplica el DRODN para obtener una aproximación del volumen útil de balsa ( $V_u$ ) y el tiempo de operación óptimo en la red (OT) y en el sondeo ( $OT_s$ ) a partir de las necesidades medias mensual de agua de los cultivos ( $L_m$ ) para satisfacer las necesidades máximas de caudal y altura. En una segunda etapa con el valor de OT se calcula el caudal demandado mediante el algoritmo de curvas aleatorias de demanda diaria (RDDC) (Moreno et al., 2007) y se procede a calcular con la herramienta DRODN el volumen óptimo de balsa, según se describen a continuación:

**1.- La primera etapa** consiste en cuantificar la demanda media diaria de agua en la red ( $L \text{ s}^{-1}$ ) en función de la eficiencia de riego ( $E_a$ ), la superficie a regar ( $S$ ), la evapotranspiración de la alternativa de cultivos ( $ET_c$ ) (calculada por la ecuación de Penman Monteith), y las pérdidas producidas en la balsa ( $P_b$ ), que se estiman en un 7% del agua almacenada (Molina, 2004). La distribución de la demanda mensual para la alternativa de cultivos fue de 19,7; 38,3; 65,0; 49,9 y 3,1 mm regando de mayo a septiembre respectivamente, lo que supone  $176 \text{ mm año}^{-1}$ .

**2.- La segunda etapa** consiste en obtener la distribución de los caudales de una red de riego a la demanda a partir de la generación diaria de caudales aleatorios (RDDC) considerando la apertura aleatoria de hidrantes, el tiempo de operación (OT), los parámetros de riego (intervalo ( $I_r$ ) y tiempo de riego ( $T_r$ )) de cada parcela y tipo de cultivo, y generando una curva aleatoria de demanda al sumar la descarga de todos los hidrantes abiertos localizados aguas abajo de la red. Este caudal se obtuvo cada 15 min según el OT

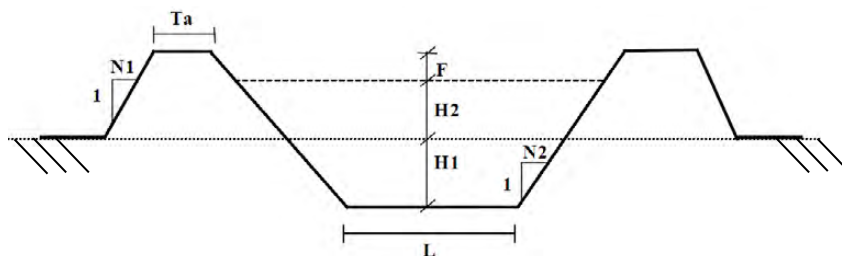
(obtenidos en una primera etapa con  $L_m$ ) para los 10 días de máxima necesidades de agua del cultivo; todo el cálculo de demanda se hizo a fin de evaluar la capacidad de regulación de la balsa y posteriormente calcular el volumen de la balsa con DRODN considerando el caudal máximo ( $Q_{max}$ ) obtenido con la metodología RDDC; para el resto de los días de la campaña de riego la demanda se cuantificó con la metodología de  $L_m$  de la primera fase.

Se evaluaron los costes anuales para garantizar el caudal y la presión en la cabecera de la red de riego, así como el tamaño de balsa de regulación, contemplando 9 escenarios de niveles dinámicos (0, 10, 50, 75, 100, 125, 150, 200 y 250 m).

## 2.4. Diseño de la balsa

El volumen de la balsa se calculó considerando la demanda de agua de la alternativa de cultivos ( $N_n$ ), la disponibilidad de agua en el acuífero, las horas de bombeo utilizadas y las curvas características del sistema de bombeo.

Se consideró una balsa con forma tronco piramidal invertido de base cuadrada, semienterrada, cubierta con lámina de polietileno (Figura 2). El volumen de la balsa ( $V_T$ ) es el volumen útil ( $V_u$ ) incrementado en 20% como margen de seguridad (Jowitt y Germanopoulo 1992, Amigó y Aguiar 1994). Para el cálculo del  $C_T$  se consideró además que  $V_u$  no fuera inferior a la mayor demanda de agua diaria en todo el período de funcionamiento del sistema (Pulido-Calvo *et al.*, 2003).



**Figura 2.** Sección transversal de la balsa de regulación y variables que la describen.

Para establecer las dimensiones geométricas ( $L$ ,  $H1$  y  $H2$ ) que hacen mínimo el coste de inversión de la balsa para un  $V_T$  conocido, se desarrolló un algoritmo específico de cálculo usando el método numérico de Newton (Conte y Boor, 1974); se fijaron los valores de  $N1 = 1,5$ ;  $N2 = 2$ ;  $Ta = 5$  m;  $F = 1$  m; y  $CF = 10$  % ( $CF$  es el coeficiente para compensar la diferencia de volumen en el movimiento de tierra debido al nivel de compactación) que dependen de los métodos y técnicas de construcción (Amigó y Aguiar 1994, Pulido-Calvo *et al.*, 2006 y CNEGP, 2010). Las alturas del agua contenida en el depósito ( $H1+H2$ ) se consideraron en el rango de 2 a 12 m (Giscosa, 1995).

Una vez calculado el  $V_u$  se realiza un segundo cálculo que indique el volumen mínimo de regulación ( $V_{min}$ ), desarrollando un algoritmo basado en el concepto de periodo de vaciado (López *et al.*, 1993), partiendo de la demanda diaria de agua de la red en periodo punta y las necesidades de rebombeo a la red de riego, el aporte potencial horario del bombeo (APH) del sistema de bombeo y las horas optimizadas para el llenado ( $H_{Uj}$ ) y vaciado de la balsa ( $H_{Ud}$ ) teniendo en cuenta los costes de la energía en los distintos periodos tarifarios (Figura 3). Con este procedimiento se obtienen los balances de volumen en la balsa cada 15 min durante los 10 días críticos del mes de máxima demanda del cultivo y se obtiene el  $V_{min}$ .

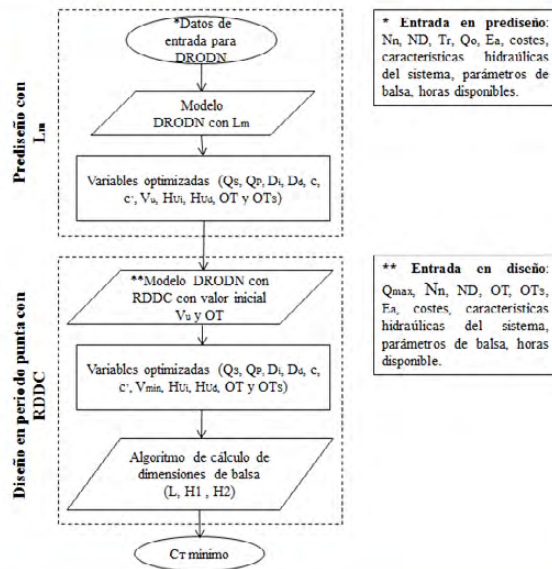


Figura 3.- Organigrama de cálculo de volumen mínimo de regulación en balsa.

## 2.5- Costes anuales de inversión

A fin de determinar los costes anuales de inversión desde sondeo hasta la entrega de agua en cabecera de la red de riego ( $C_a$ , en  $\text{€} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ ), se consideraron los precios medios de diferentes empresas de manufactura, distribución y servicios de riego en España. Los componentes de los costes de bombas, tuberías e instalación en bombeo se agruparon en ecuaciones de regresión, los coeficientes de determinación de las curvas de regresión de costes fueron altamente significativos ( $> 0,94$ ).

La anualidad de la inversión ( $A = \text{CRF} \cdot C_i$ , en  $\text{€} \cdot \text{año}^{-1}$ ) correspondiente a los costes de inversión ( $C_i$ , en  $\text{€}$ ) se calculó considerando una vida útil ( $n$ ) de 12 años para bombas y 24 años para el resto de equipos, tubería y accesorios (Scherer y Weigel, 1993), y una tasa de interés ( $i$ ) de 6%. El factor de recuperación del capital (CRF) y la anualidad de la inversión por unidad de superficie ( $C_a$ , en  $\text{€} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ ) fueron calculados mediante las ecuaciones (4) y (5).

$$\text{CRF} = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (4)$$

$$C_a = \frac{A}{S} = \frac{\text{CRF} \cdot C_i}{S} \quad (5)$$

donde  $S$  es el área regada por la red colectiva de riego ( $\text{ha}$ ).

## 2.6- Costes anuales de operación

La potencia absorbida ( $N_p$ , en  $\text{kW}$ ) en la extracción de agua desde el sondeo y en la alimentación a red de riego para las condiciones de funcionamiento de cada mes de la campaña de riego, fueron calculadas según la presión ( $H_T$ , en  $\text{m}$ ) y el caudal ( $Q$ , en  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) necesarios para el adecuado funcionamiento del sistema mediante la ecuación (6).

$$N_p = \frac{9,81QH_T}{\eta} \quad (6)$$



donde  $\eta =$  es la eficiencia del sistema de bombeo (0,6 en caso de estudio). Las pérdidas de carga por fricción en tubería fueron calculadas con la ecuación de Hazen-William. En las tuberías las pérdidas locales han sido estimadas en un 10% de las pérdidas por fricción.

Los costes operacionales anuales por unidad de área ( $C_e$ ,  $\text{€} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{años}^{-1}$ ) se calcularon dividiendo los  $C_{op}$  por el área regada ( $S$ , en ha), siendo  $C_{op}$  la suma de los costes anuales en el sondeo y en la inyección de agua a la red. En cada caso fueron calculados con las ecuaciones 7 y 8.

$$C_{op} = \text{Acceso a potencia} + \text{Consumo energético} \quad (7)$$

$$C_{op} = \sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^k (N_p)_i Pa_{ij} + \sum_{i=1}^{12} \sum_{j=1}^k (N_p)_i T_{ij} P_{ij} \quad (8)$$

donde  $N_p =$  potencia de la bomba calculada a partir de la ecuación (6) en kW;  $T =$  tiempo de operación mensual de la bomba en horas;  $Pa =$  precio de acceso a la potencia ( $\text{€} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{mes}^{-1}$ );  $P =$  precio de la energía en  $\text{€} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ; los índices  $i$  y  $j$  se refiere a los meses y precio de la energía en las horas ( $k$ ) durante el día, respectivamente.

Los costes energéticos fueron los vigentes en España para 2012 publicados por el Boletín Oficial del Estado (BOE). Se consideró la posibilidad del cambio de precio de la energía (EAE) debido a la tasa de inflación, por lo que se usa la ecuación de ajuste de Keller y Bliesner (1990).

## 2.7- Costes de mantenimiento

Se adicionó un 5% de los costes de inversión, como costes de mantenimiento necesario para que el sistema planteado cumpla con su vida útil de 12 años para bombas, y 24 años para el resto de equipos, tuberías y accesorios.

## 2.8- Costes de extracción del agua ( $C_S$ ) y coste de alimentación a la red de riego ( $C_R$ )

Dentro del  $C_T$  se puede distinguir a su vez entre el coste de extracción del agua ( $C_S$ ) y el coste de entrega del agua a la cabecera de la red de riego ( $C_R$ ), siendo el  $C_T$  la suma de los dos. El  $C_S$  es el de transportar el agua desde la fuente hasta la a balsa incluyendo los costes de inversión ( $C_{aS}$ ) y de operación ( $C_{eS}$ ) en este proceso, dejando el agua a presión atmosférica a la salida. El  $C_R$  es el de llevar el agua desde la balsa hasta la cabecera de la red de riego, con las condiciones de presión y caudal que necesite en cada momento.

Los coste anual de extracción del agua ( $C_S$ ;  $\text{€} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ ), y de entrega de agua a la red ( $C_R$ ;  $\text{€} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ ) (ecuaciones 8 y 9) serán, es la suma de los de inversión, incluido el 5% para mantenimiento, y de energía.

$$C_S = (C_{aS} + C_{eS}) \quad (8)$$

$$C_R = (C_{aR} + C_{eR}) \quad (9)$$

donde  $C_{aS}$  y  $C_{aR} =$  los costes anuales de inversión, incluido el mantenimiento, ( $\text{€} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ ) para la extracción y suministro de agua a la red;  $C_{eS}$  y  $C_{eR} =$  los costes anuales de energía ( $\text{€} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ ) para la extracción y suministro de agua a la red. Estos mismos costes se pueden expresar también por unidad de volumen bombeado (ecuaciones 10 y 11).

$$C_{wS} = (C_{aS} + C_{eS}) \cdot N_n^{-1} \cdot E_a \quad (10)$$

$$C_{wR} = (C_{aR} + C_{eR}) \cdot N_n^{-1} \cdot E_a \quad (11)$$

donde  $C_{wS}$  y  $C_{wR} =$  los costes anuales de extracción del agua y de entrega de agua a la red respectivamente ( $\text{€} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{año}^{-1}$ );  $N_n =$  Necesidades netas de riego ( $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ );  $E_a =$

eficiencia general de aplicación del agua por la red de riego (Keller y Bliesner, 1990). En este trabajo se consideró  $E_a = 88\%$  (Carrión et al., 2013).

### 3- Resultados y Discusión

#### 3.1- Volumen óptimo de balsa

Al calcular el volumen útil de la balsa ( $V_u$ ) para garantizar el agua consumida en el día de mayor consumo o el volumen mínimo necesario para la regulación ( $V_{min}$ ), resultó que,  $V_u$  fue hasta un 73% mayor que el  $V_{min}$  para  $ND < 50$  m y  $ND > 150$  m, y un 71% mayor para  $ND$  entre 50 y 150 m (Figura 4). Los menores valores de  $V_{min}$  se obtienen cuando las horas de operación de la red son muy similares a los tiempos de operación en sondeo. En cambio cuando las horas de funcionamiento de la red son mayores que las de extracción de agua resultan volúmenes de regulación mayores, al resultar mayor el caudal óptimo de la extracción de agua

La balsa en la red de riego de la zona de estudio tiene un  $V_T$  de 20 000  $m^3$  y fue diseñada para un posible cambio de cultivos de mayor demanda de agua y una posible ampliación de la zona regada, por lo que actualmente este volumen resulta excesivo considerando lo estable del suministro de agua por el bombeo. El optimizador indica un  $V_T$  medio de la balsa entorno a los 5 000  $m^3$ , es decir 75% inferior al volumen diseñado. **Reca et al. (2014)** señalan que el aumento de los costes energéticos favorece el uso de balsas en cualquier sistema de riego ya que permite reducir los costes, principalmente en las condiciones semiáridas españolas, por lo que el tamaño resultante es bastante sensible a las variaciones del precio de la energía.

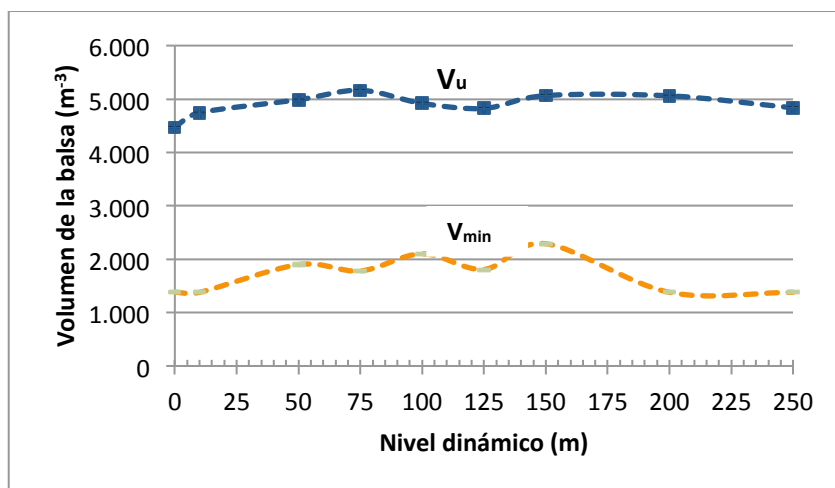


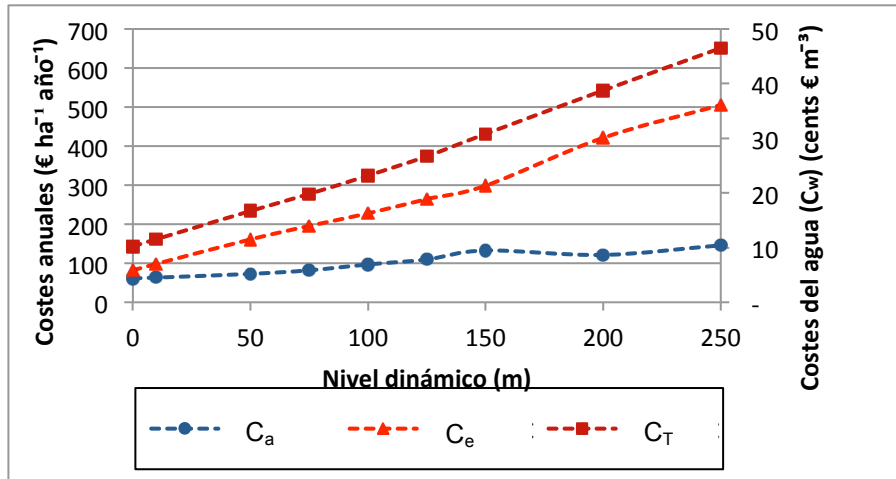
Figura 4- Volumen de balsa, útil ( $V_u$ ) y mínimo ( $V_{min}$ ) en la red de riego.

La metodología de RDDC por su condición probabilística genera las ligeras oscilaciones de los volúmenes de balsa que se aprecian en la Fig. 4. Los menores volúmenes de regulación ( $V_{min}$ ) obtenidos se deben a que usan mayor número de horas de bombeo (Figura 8).

#### 3.2- Coste total ( $C_T$ ) de suministro de agua a una en red de riego a la demanda.

El  $C_T$  crece directamente proporcional con el  $ND$  (Figura 5), su coeficiente de determinación ( $R^2$ ) es  $> 0,98$ . La principal componente del  $C_T$  es la energía ( $C_e$ ) (entre 57 y 78% de los  $C_T$ ). Los  $C_e$  son los que originan el crecimiento sostenido del  $C_T$  ya que los  $C_i$  experimentan un crecimiento pequeño hasta  $ND = 150$  m, manteniéndose en valores

similares para ND superiores. Esto último es debido a que la solución óptima elige bombas de menor potencia ( $< C_a$ ) pero con mayor número de horas de funcionamiento ( $> C_e$ ).



**Figura 5-** Coste total ( $C_T$  € ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>), costes de inversión ( $C_a$ ), costes energéticos ( $C_e$ ) y costes de entrega del agua a la red de riego ( $C_w$ ).

### 3.3- Costes del metro cúbico de agua entregada a la red de riego ( $C_w$ ).

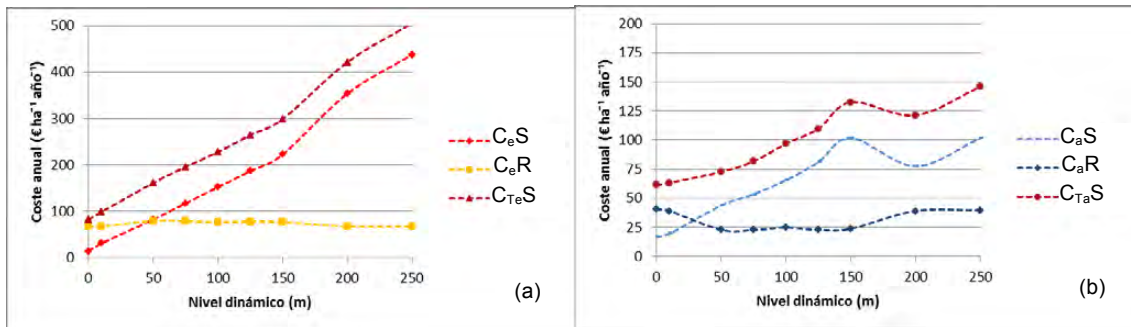
Los resultados se muestran en la Figura 5. Los  $C_{we}$  están por encima de los  $C_{wa}$  en todos ND y los escenarios considerados, llama la atención el incremento del coste de energía en la extracción al aumentar el ND creciendo a razón de 0,11 cent € m<sup>-3</sup> m<sup>-1</sup>, mientras que los costes de inversión crecen en menor medida (0,02 cent € m<sup>-3</sup> m<sup>-1</sup>).

Los costes totales de entrega de agua a la red dependen de la profundidad de extracción de agua, aumentando desde 9,6 hasta 43,4 cent € m<sup>-3</sup> para ND = 0 y 250 m respectivamente (Figura 5). Los  $C_w$  para ND = 100 m, están en torno a 21 cent € m<sup>-3</sup>, esto valores siguen siendo elevados para las explotaciones agrícolas de la Mancha Oriental, en Albacete, que admitirían un máximo de 18 cent € m<sup>-3</sup> (Castillo, 1997).

### 3.4- Costes de extracción de agua ( $C_s$ ) y del rebombado a la red de riego ( $C_R$ ).

En la Figura 6 se recoge, la evolución de los costes de energía (Fig. 6a) y de inversión (Fig. 6b) con el ND. El comportamiento del  $C_T$  antes comentado viene originado por el proceso de extracción del agua ya que en el rebombado para alimentar a la red, tanto los costes anuales de inversión ( $C_{aR}$ ) como de energía ( $C_{eR}$ ) experimentan escasas variaciones ( $< 16$  € ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) con el ND al tener que suministrar una presión en cabecera de red constante (45 m en este estudio) y la escasa variación del nivel de agua en la balsa.

Las diferencias de comportamiento de la solución óptima de mínimo  $C_T$ , se manifiestan principalmente en la extracción. Se produce un incremento del  $C_{eS}$  en el proceso de extracción de agua para ND  $> 150$  m (Fig. 6a) debido a que el optimizador selecciona menor caudal (Fig. 7b), con menor potencia (Fig. 7a), por lo que requiere mayor número de horas de funcionamiento (Fig 6a) ( $> C_{eS}$ ). Esta es una fortaleza de la herramienta DRODN, al poder estudiar el proceso de extracción y suministro de agua a la red en su conjunto, teniendo en cuenta la variación de la demanda de agua durante la campaña de riegos.

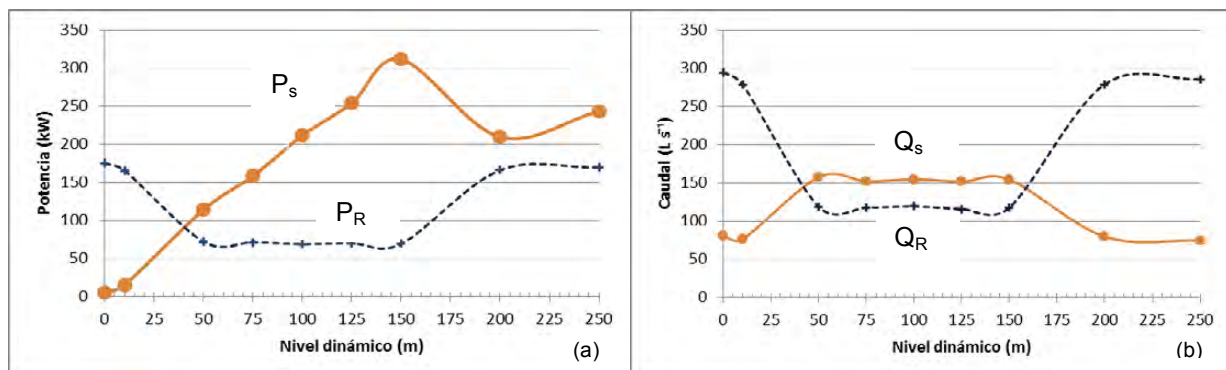


**Figura 6-** Coste anuales total ( $C_T \text{ € ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ), desglosados: a) costes energéticos ( $C_e$ ) y costes de inversión ( $C_a$ ), en la extracción de agua (S) y en rebombero a la red de riego (R).

### 3.5- Relación entre el caudal y el consumo de energía en los distintos periodos tarifarios.

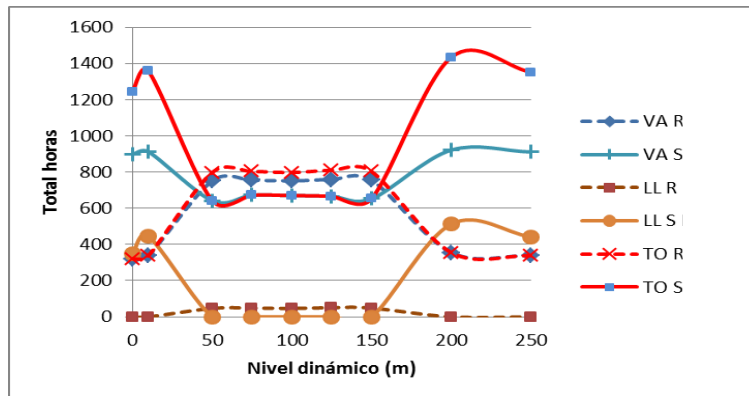
En las Figuras 7 y 8 se presenta la evolución de la potencia de bombeo que conduce al  $C_T$  mínimo, del caudal óptimo y el consumo de energía en los distintos periodos tarifarios respectivamente.

Los caudales óptimos de alimentación a la red son algo más de  $115 \text{ L s}^{-1}$  para ND entre 50 y 150 m y  $278 \text{ L s}^{-1}$  para ND < 50 m y ND > 150 m, y las potencias entre 70 y 170 kW respectivamente (en los intervalos de ND indicados)(Figura 7), utilizando las horas valle (en torno a 750 h) y algunas pocas llano para ND entre 50 y 150 m, y solo una pocas horas valle (en torno a 340 h) para ND < 50 m y ND > 150m (Figura 8).



**Figura 7-** Potencia de bomba consumida en la extracción de agua ( $P_S$ ) y en el rebombero a la red de riego ( $P_R$ ), caudal en la extracción ( $Q_S$ ) y en la red ( $Q_R$ ).

En la extracción de agua se produce un cambio de comportamiento de la potencia a partir de ND > 150 m (Fig. 7a), donde la solución de  $C_T$  mínimo se consigue aumentando el consumo de energía (mayor número de horas valle y llano, (Fig. 8a) y disminuyendo la inversión (Fig. 6b). La razón está en que el coste de inversión en bombas crece exponencialmente con su potencia, por lo que, a partir de un determinado valor de potencia, se obtiene mínimo  $C_T$  aumentando el consumo de energía y disminuyendo la inversión en bombas. Esta es una ventaja de disponer de una herramienta de ayuda en la toma de decisiones como DRODN, al permitir identificar el cambio en la estrategia de optimización del  $C_T$  en función de los costes de inversión y de energía en cada país, pudiendo obtenerse soluciones muy distintas para los mismos sistemas de distribución del agua de riego según sea la relación entre los costes de inversión y de energía.



**Figura 8-** Horas consumidas en valle (VA), llano (LL) y total (TO), en la extracción de agua (S) y el rebombéo a la red de riego (R).

#### 4- Conclusiones y Recomendaciones

Se ha desarrollado el modelo DRODN bajo el entorno MATLAB como herramienta para optimizar el diseño y la gestión del sistema de distribución de agua, y el almacenamiento para alimentar redes de riego a la demanda, contribuyendo a mejorar la eficiencia del uso del agua y la energía en el regadío. Esta herramienta ayuda en la toma de decisiones en los procesos de modernización de regadíos, donde la escasez de agua para riego y el alto coste de la energía pueden condicionar la viabilidad de esos regadíos.

Dados los altos costes de construcción de balsa, para el cálculo de su tamaño óptimo se debe tener en cuenta la forma de operación y manejo de la red de distribución de agua a fin de abaratar los costes anuales de riego y/o dar mayor garantía de suministro de agua a la red de riego.

El coste energético, es el componente más importante en los  $C_T$  para todos los ND evaluados, pasando de ser 63% para ND = 0 a 80% para ND = 250m. Por lo que está variable en los costes de riego debe ser muy analizada al momento de poner en marcha cualquier proyecto de riego.

#### 5- Bibliografía

- Amigó E. & Aguiar, E. (1994). Manual para el diseño, construcción y explotación de embalses impermeabilizados con geomembranas, Dirección General de Estructuras Agrarias, Consejería de Agricultura y Alimentación, Gobierno de Canarias.
- Carrión F., Tarjuelo, J.M., Carrión, P., & Moreno, M.A. (2013). Low-cost microirrigation system supplied by groundwater: An application to pepper and vineyard crops in Spain. *Agricultural Water Management*, 127, 107–118.
- CNEGP. (2010). Manual para el diseño, construcción, explotación y mantenimiento de balsas, Ministerio de medio ambiente y medio rural y marino. Madrid, España: Comité Nacional Español de Grandes Presas. 272 p.
- Conte, S. D. & Boor, C. (1974). La solución de ecuaciones no lineales. Análisis numérico elemental, un enfoque algorítmico. (2da ed.). México: McGraw-Hill.
- ESYRCE. (2011). Encuesta de Superficies y Rendimientos de Cultivos en España Ministerio de Medioambiente y Medio Rural y Marino (MARMA). 166 p.





- Giscosa. (1995) Todo sobre la impermeabilización de embalses con geomembranas sintéticas. *Impermeabilización profesional*, 7: 61-78.
- Hirose, S. (1997). Determination of the capacity of a regulating pond in a pipeline irrigation system. *Rural and Env. Engrg.*, 33, 66-78.
- Jowitt P.W. & Germanopoulos, G. (1992). Optimal pump scheduling in water-supply networks. *J. Water Resour. Planning and Mgmt.*, 118(4), 406-422.
- JCRMO. (2012). Inventario de regadíos de la JCRMO. Memorias anuales. España: Junta Central de Regantes de la Mancha Oriental. <http://www.jcrmo.org/index.php?id=38>.
- Keller, J., & Bliesner, R.D. (1990). *Sprinkle and trickle irrigation*. New York, NY, USA: AVI Book, Van Nostrand Reinhold.
- López-Luque, R., Reca, J., & Roldán, J. (1993). Algoritmo de selección y gestión de tarifas de energía eléctrica en los sistemas de impulsión de agua. *Actas de las XI Jornadas Técnicas sobre Riegos*, Valladolid, España, (pp 323-328).
- Molina, J.M. (2004). Caracterización y modelización de la evaporación en tanques evaporímetros y embalses de riego. Evaluación de los efectos de mallas de sombreado. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cartagena, España. 207 p.
- Moreno, M.A., Medina, D., Ortega, J.F. & Tarjuelo, J.M. (2012). Optimal design of center pivot systems with water supplied from wells. *Agricultural Water Manage*, doi:10.1016/j.agwat.2012.01.016.
- Moreno, M.A., Planells, P., Ortega, J.F., & Tarjuelo, J.M. (2007). New methodology to evaluate flow rates in on-demand irrigation networks. *Journal of irrigation and drainage engineering (ASCE)*, 133(4), 298–306.
- Nel, D., & Haarhoff, J. (1996). Sizing municipal water storage tanks with Monte Carlo simulation. *J. Water SRT-Aqua*, 45(4), 203-212.
- Nelder, J.A., & Mead, R. (1965). A simplex method for function minimization. *Comput. Journal.*, 7(4), 308–313.
- Pulido-Calvo, I., Gutiérrez-Estrada, J.C., López-Luque, R., & Roldán, J. (2006). Regulating reservoirs in pressurized irrigation water supply systems. *Journal. Water SRT-Aqua*, 55(5), 367–381.
- Pulido Calvo I., Gutierrez, J.C., Roldán, J., & López, R. (2006). Depósitos de regulación en cabeceras de redes hidráulicas a presión. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, 10(2), 81-96.
- Pulido-Calvo, I., Roldán, J., López-Luque, R., & Gutierrez-Estrada, J.C. (2003). Water delivery planning considering irrigation simultaneity. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 129 (4), 247–255.
- Pulido-Calvo, I. & Gutiérrez-Estrada, J.C. (2011). Selection and operation of pumping stations of water distribution systems. *Environmental Research Journal*, 5(3), 1–20.
- Reca, J., García-Manzano, A., & Martínez, J. (2014). Optimal pumping scheduling model considering reservoir evaporation. *Agricultural Water Manage*, 148, 250-257.
- Scherer, T., & Weigel, J. (1993). *Planning to irrigate*. NDSU extension service. North Dakota State University. <http://www.ext.nodak.edu/extpubs/ageng/-irrigate/ae91w.htm>.



## SOFTWARE PARA LA PROGRAMACIÓN DE UN RIEGO DE PRECISIÓN EN EL CULTIVO DE LA FRESA

*González Perea, R.<sup>1</sup>, Fernández García, I.<sup>1</sup>, Martín Arroyo, M.<sup>1</sup>, Rodríguez Díaz J.A.<sup>1</sup>,  
Camacho Poyato, E.<sup>1</sup>, Montesinos, P.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Departamento de Agronomía. Universidad de Córdoba. Campus Rabanales, Edif. Da Vinci, 14071. Córdoba. E-mail: [g72goper@uco.es](mailto:g72goper@uco.es), [g52fegai@uco.es](mailto:g52fegai@uco.es), [o02maarm@uco.es](mailto:o02maarm@uco.es), [jarodriguez@uco.es](mailto:jarodriguez@uco.es), [pmontesinos@uco.es](mailto:pmontesinos@uco.es), [ecamacho@uco.es](mailto:ecamacho@uco.es)

### Resumen

Bajo un escenario de menor disponibilidad de agua, aumento de la frecuencia de las sequías y las incertidumbres asociadas al cambio climático, el sector del riego en Europa tiene que aumentar la productividad del agua mediante una mejora de la eficiencia en el uso de la misma. El sector fresero concentrado en un entorno de alta sensibilidad medioambiental (Parque Nacional de Doñana, Huelva, España) es un buen ejemplo de cultivo con alta dependencia de recursos hídricos. Más del 90% de la producción es destinada a mercados internacionales que demandan fresas de alta calidad, producidas en condiciones sostenibles. Por tanto, para asegurar la supervivencia del cultivo de fresa en la zona de Huelva resulta imprescindible desarrollar herramientas que permitan a los productores un uso óptimo de estos recursos hídricos. Por ello, el objetivo de este trabajo fue desarrollar un software (Irri-Fresa) que permita a los productores de fresa en la zona de Huelva realizar una programación de riego que maximice la eficiencia en el uso de los recursos hídricos, teniendo en cuenta la configuración hidráulica de cada sector de riego así como las condiciones climáticas en tiempo real de la zona y el estado fenológico del cultivo. Irri-Fresa proporciona al sector del cultivo de la fresa una herramienta fácil y rápida para obtener una programación de riego óptima y actualizada por semanas y personalizada por cada usuario. Este software, actualmente, está siendo usado satisfactoriamente por diversos productores de la zona, obteniendo ahorros significativos de agua, ayudando a concienciar al sector fresero de la importancia de conocer y optimizar sus consumos de agua.

## 1- Introducción

La escasez de agua y la creciente preocupación sobre el impacto que el uso excesivo de esta agua puede ocasionar en el medio ambiente hace que la agricultura de regadío se encuentre amenazada (Fereres *et al.*, 2011). En un escenario de menor disponibilidad de agua, aumento de la frecuencia de las sequías y las incertidumbres asociadas al cambio climático, el sector del riego en Europa tiene que aumentar la productividad del agua mediante una mejora de la eficiencia en el uso de la misma (Hunt, 2004; Rodríguez Díaz *et al.*, 2007). La producción de fresas es un buen ejemplo de cultivo intensivo de regadío que está muy demandado por los mercados europeos tanto para consumo en fresco como para industria. La mayor concentración de la producción de fresas en Europa y la segunda en el mundo se encuentra en Huelva (Sureste de España). Más del 90% de la producción es destinada a mercados internacionales que demandan fresas de alta calidad, producidas en condiciones sostenibles. El 73% de la producción total de fresa en Huelva se encuentra en las inmediaciones del Parque Nacional de Doñana, área con una alta sensibilidad medioambiental (Fundación Doñana 21, 2006). Esto unido a la alta dependencia que este cultivo tiene de los recursos hídricos hace que exista una gran preocupación por la sostenibilidad ambiental de la producción del cultivo en la zona. Por tanto, un uso óptimo de este recurso resulta fundamental para asegurar la supervivencia del cultivo de fresa en la zona de Huelva.

El establecimiento de un riego de precisión óptimo, que aporte en cada momento el agua necesaria según las condiciones climáticas y estado fenológico de la planta, es de vital importancia para conseguir un uso óptimo del recurso hídrico. Un riego de precisión implica tanto la evaluación precisa de las necesidades de agua de los cultivos como la aplicación exacta de agua en el momento y el lugar adecuado y el uso de elementos hidráulicos con altas eficiencias volumétricas que permitan aplicación espacialmente uniformes (Smith *et al.*, 2010). Los sistemas de micro-riego son capaces de aplicar pequeñas cantidades de agua en intervalos de tiempo cortos. Estos sistemas se diseñan para mantener la zona del suelo donde se encuentra la mayor densidad radicular cerca de un nivel óptimo de humedad. Estos sistemas se pueden controlar fácilmente y normalmente, son automatizados (Phene and Howell, 1984; Meron *et al.*, 1996; Dukes and Scholberg, 2004; Wanjura *et al.*, 2004; Evett *et al.*, 2006).

Son muchos los autores que han desarrollado metodologías para realizar una programación de riego que maximice el uso del agua. Kloke *et al.*, 2009, por ejemplo, establece una herramienta para realizar una programación basándose en un riego deficitario. El alto valor económico que posee el sector fresero junto con las estrategias comerciales que los agricultores persiguen hace que el riego deficitario no sea una práctica viable en este entorno. Otros autores han desarrollado metodologías y herramientas de programación de riego, para otros cultivos, basándose en balances de agua en el suelo, o restricciones de agua en un determinado periodo (Bergez *et al.*, 2000; Bartlett *et al.*, 2014) sin tener en cuenta la configuración del sector de riego, la eficiencia del sistema hidráulico o la uniformidad de distribución del agua en parcela. La eficiencia de un sistema de micro riego, principalmente el riego por goteo, habitualmente es considerada como más del 90%. Sin embargo, como en otros sistemas, la capacidad de lograr un alto nivel de eficiencia es más una función de gestión que una propiedad intrínseca del sistema (Smith *et al.*, 2010). Por ejemplo, Shannon *et al.* (1996) encontraron que la eficiencia de la aplicación de un riego por goteo en condiciones comerciales en un cultivo de caña de azúcar varió entre 30 y el 90%, debido principalmente, a un exceso de riego y percolación profunda. Las principales causas por las que un sistema de riego puede presentar una baja uniformidad se centran en la variación de presión a lo largo de un ramal de riego, la obstrucción de emisores y/o una gestión no adecuada del riego.

Todo esto, unido a las particulares condiciones en las que se desarrolla el cultivo de fresa en Huelva (suelos extremadamente arenosos, uso de cintas de riego no adecuadas

para realizar un riego de precisión, alta variabilidad en la configuración de sectores de riego, desarrollo del cultivo tanto fuera como dentro de macrotúneles, etc.) hace que establecer una programación de riego óptima sea una tarea extremadamente compleja. Por ello, el objetivo de este trabajo es desarrollar un software que permita a los productores de fresa en la zona de Huelva realizar una programación de riego que maximice la eficiencia en el uso de los recursos hídricos, teniendo en cuenta la configuración hidráulica de cada sector de riego así como las condiciones climáticas en tiempo real de la zona y el estado fenológico del cultivo.

## 2- Metodología

### 2.1. Programación del riego

Para realizar una óptima programación de riego en el cultivo de la fresa son muchos los factores que deben ser considerados, debido a sus condiciones particulares de producción. Necesidades teóricas del cultivo, suelos muy arenosos, producción bajo plástico, alta variabilidad de configuración de sectores, etc. son algunos de estos factores que influyen en el cálculo del tiempo total de riego.

Para el cálculo de las necesidades teóricas del cultivo ( $ET_c$ ) se empleó la ecuación desarrollada por Allen *et al.* (1998) adaptada para considerar las condiciones particulares de producción de fresa (Ec. 1):

$$ET_c = \sum_{\substack{i=1 \dots n \\ j=1 \dots n}} K_{cij} \cdot ET_{ofp} + \sum_{\substack{i=n+1 \dots k \\ j=m+1 \dots l}} K_{cij} \cdot ET_{obp} \quad (1)$$

donde  $i$  es el índice que indica el día de la campaña,  $j$  es índice que indica la fase de desarrollo en la que se encuentra el cultivo,  $K_c$  es el coeficiente de cultivo que varía a lo largo del ciclo de producción y cuyos valores se obtuvieron de trabajos previos en la zona (Allen *et al.*, 2006 and WWF, 2009),  $ET_{ofp}$  y  $ET_{obp}$  ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) son la evapotranspiración de referencia estimada fuera y dentro del macrotúnel, respectivamente.  $ET_{ofp}$  se obtuvo a través del promedio de una serie histórica de los últimos 10 años de las estaciones agroclimáticas más cercanas a la zona de estudio y  $ET_{obp}$  se obtuvo corrigiendo la serie histórica de  $ET_{ofp}$  con un valor de transmisividad de un plástico tipo utilizado en la zona para cubrir los macrotúneles.

Por otro lado, las características del sector de riego (tipo de emisor, número de macrotúneles, dimensiones de los mismos, etc.) tienen una gran influencia sobre la eficiencia en la aplicación del agua de riego (rendimiento de aplicación,  $R_a$ ).  $R_a$  es un índice relacionado con la uniformidad de un sector de riego ( $U_{sr}$ ) (Martín, 2013; Bralts and Kesner, 1983) que se define como la relación entre el volumen de agua aplicada por los emisores de riego y el volumen de agua aprovechado por la planta. Así, este índice transforma las necesidades de riego teóricas del cultivo ( $ET_c$ ) en las necesidades de agua brutas que se requiere para satisfacer las necesidades de riego de los cultivos. Mediante el software de simulación hidráulica *EPANET* (Rossman, 2002) se obtuvo una relación entre  $R_a$  y la superficie del sector de riego, para las configuraciones típicas de la zona. Así, en la Tabla 1 se representa los valores de  $R_a$  obtenidos para cada tamaño de sector de riego.

**Tabla 1.** Relación entre  $R_a$  y superficie de un sector de riego.

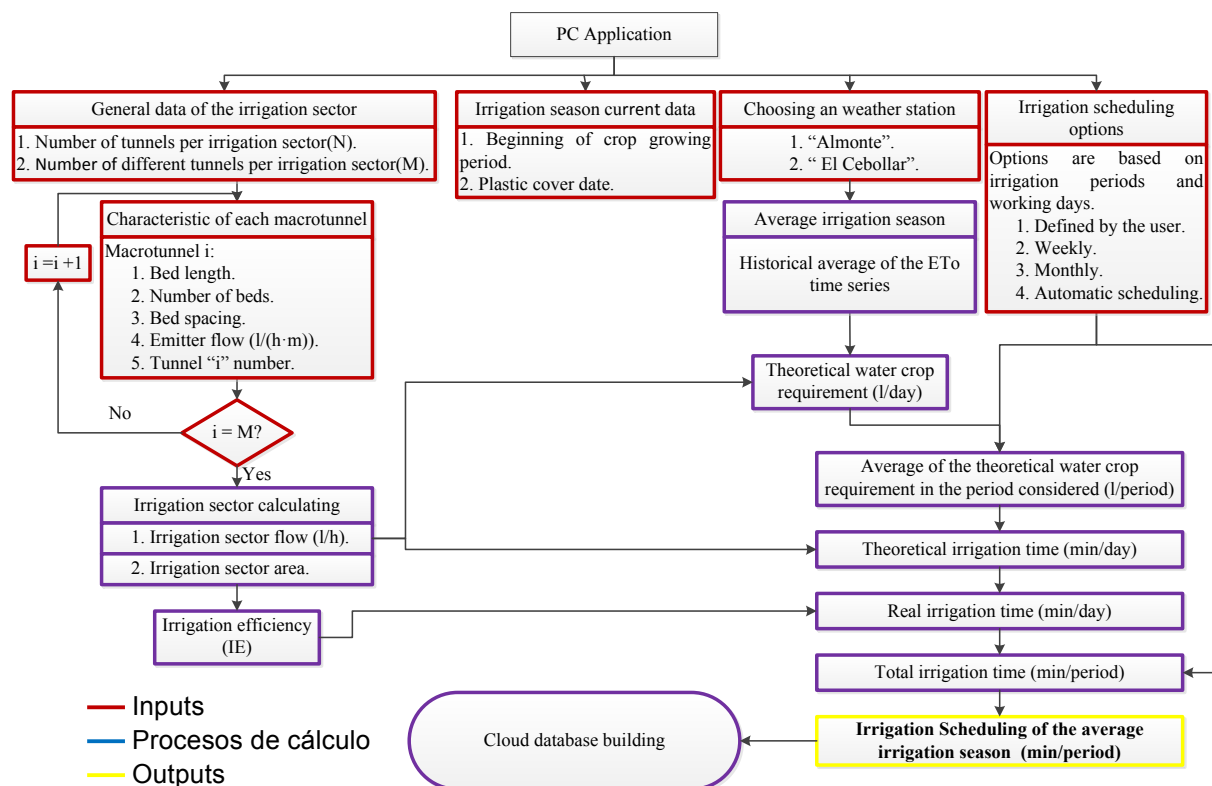
	Superficie del sector ( $S_{\text{sector}}$ ) (ha)			
	$S_{\text{sector}} \leq 0.25$	$0.25 < S_{\text{sector}} \leq 0.5$	$0.5 < S_{\text{sector}} \leq 0.75$	$S_{\text{sector}} > 0.75$
$R_a$	0.9	0.85	0.8	0.75

Los tipos de cintas de riego utilizados en la zona difieren básicamente en el caudal aportado por las mismas, siendo las más usuales del tipo T-Tape de 3.0, 3.8 y 5.0 l h<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>. El tiempo de llenado de los ramales de riego se ve afectado tanto por el tipo de emisor como por las características geométricas de los macrotúneles. El efecto del tiempo de llenado de la cinta de riego fue considerado en el cálculo de la programación del riego.

## 2.2. Software.

El software desarrollado (Irri-Fresa) consta de dos módulos, ambos desarrollados con el lenguaje de programación multiplataforma JAVA.

El primer módulo es un software para PC en el cuál el usuario caracteriza la ubicación de la finca, fecha de plantación, fecha de cubrición con plástico, número de macrotúneles, número de lomos y dimensiones de los macrotúneles, caudal del emisor y número de electroválvulas para todos y cada uno de sus sectores de riego de una o más fincas. Posteriormente, el usuario puede elegir entre diferentes opciones de programación con distintos intervalos temporales. Todo ello se conoce como los inputs del programa. La salida u output de este módulo es una programación del riego (en minutos por día) para toda la campaña basándose en el promedio de los datos climáticos de una serie histórica de los 10 últimos años. Posteriormente, dicha programación se actualiza en tiempo real con los datos meteorológicos reales de la campaña. En la Figura 1 se muestra el esquema operacional de Irri-Fresa para PC.



**Figura 1.** Esquema operacional de Irri-Fresa para PC.

La programación de riego obtenida (output) es almacenada en una base de datos creada mediante el lenguaje de programación MySQL y colocada en una nube virtual. Esta base consta de cinco tablas (usuarios, fincas, sectores, programación de riego estimada, programación de riego real) en las que se recogen los usuarios del programa, características de sus fincas y sectores y tanto la programación estimada de toda la campaña (output del



software para PC) como la programación de riego real actualizada con las estaciones climáticas más cercanas a la zona.

El segundo módulo se basa en una aplicación móvil (APP) en forma de widget disponible para cualquier dispositivo que soporte Android. Dicha aplicación está conectada en tiempo real con las estaciones agroclimáticas más cercanas a la zona con el objetivo de corregir con los datos climáticos en tiempo real, la programación de riego previamente realizada (output del software para PC). Así, con esta APP el agricultor dispondrá para cada semana de la programación de riego de cada una de sus fincas. En la Figura 2 se muestra el esquema operacional de la APP de Irri-Fresa.

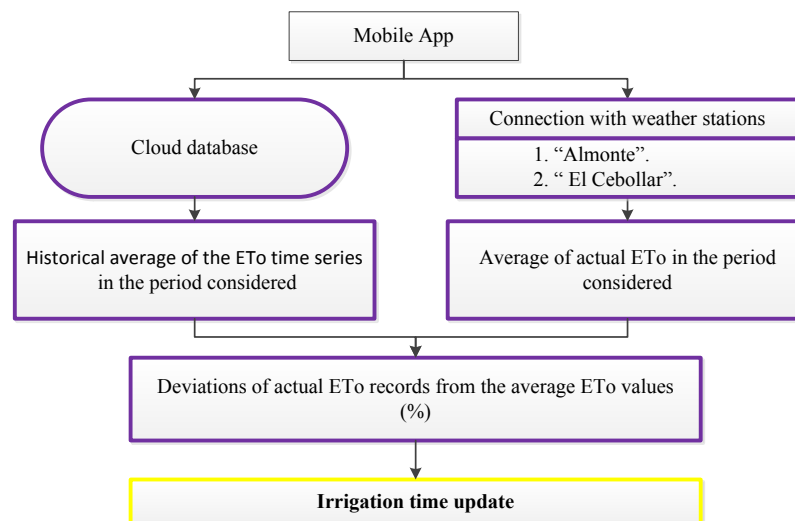


Figura 2. Esquema operacional de la APP de Irri-Fresa.

### 3- Resultados y discusión

El software desarrollado para PC consta de 12 ventanas. En la Figura 3 se muestran las dos primeras ventanas (1, 2), que se corresponden con la ventana de bienvenida al programa y de identificación del usuario.



Figura 3. Ventana de bienvenida (izquierda) y ventana de identificación (derecha).

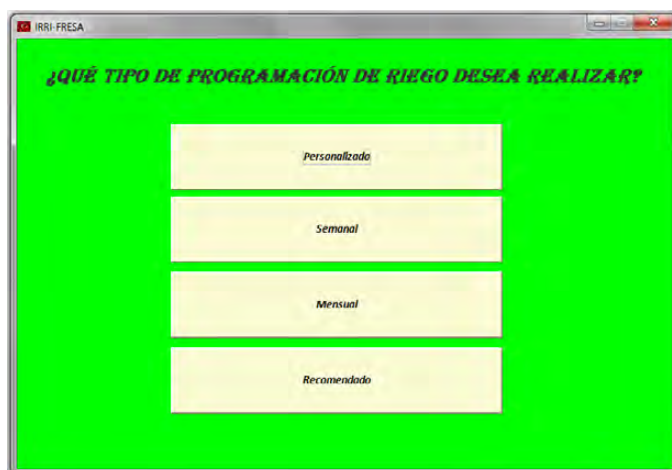
Las tres siguientes pantallas (3, 4, 5) están destinadas a la configuración de una finca y un sector (nombre de la finca, ubicación, nombre del sector, configuración del sector etc.). En la figura 4 se muestra la ventana de identificación de la finca (pantalla 3).



**Figura 4.** Ventana de identificación de la finca.

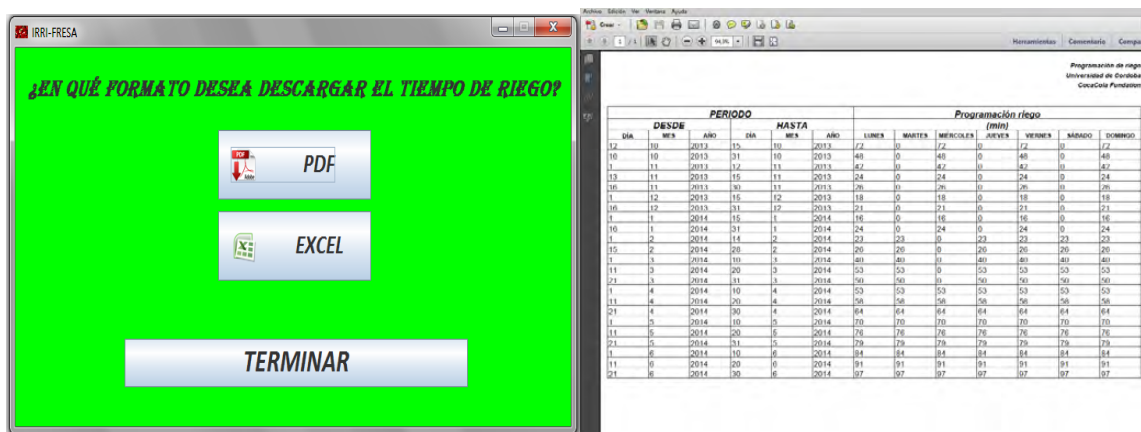
En la pantalla número 6 se caracteriza la campaña en la cual se quiere realizar la programación. En ella se establece la fecha estimada de inicio de riego con cinta y la fecha estimada de cubrición de los macrotúneles con plástico.

Las ventanas 7, 8, 9, 10 y 11 es donde se realiza la programación de riego propiamente dicha. El usuario podrá elegir entre 4 tipos de programaciones distintas, desde la más personalizada donde el usuario establece los intervalos de tiempo por meses y los días de la semana que desea regar en cada uno de esos intervalos (*Personalizado*), hasta una programación recomendada (*Recomendado*), donde el usuario únicamente decidirá los días de la semana que desea regar en los intervalos automáticamente establecidos. En la figura 5 se muestra el menú de selección de los distintos tipos de programación que Irri-Fresa proporciona.



**Figura 5.** Menú de selección del tipo de programación.

La última ventana (número 12) permite descargar la programación realiza tanto en formato PDF como en formato *x/s* o *x/sx* (Excel). En la figura 6 se muestra la última ventana y un ejemplo de salida en PDF.



**Figura 6.** Ventana de descarga de programación (izquierda) y ejemplo de una salida del programa en PDF (derecha).

Durante la campaña 2014/2015, el software desarrollado está en versión beta y está siendo usada por diferentes agricultores de la zona.

En la figura 7 se muestra el *widget* correspondiente a la APP de Irri-Fresa. En ella se puede ver la programación de la semana actual corregida en tiempo real con los datos climáticos de la zona donde se sitúa cada sector. Debido a que al final de campaña la cubierta de los macrotúneles donde se produce la fresa es retirada pero se sigue regando con la cinta de riego, el *widget* cuenta también con la opción de retirar o poner dicho plástico de los macrotúneles modificando así los tiempos de riego. Cuando el tiempo de riego excede un determinado valor, se recomienda al agricultor dividir ese tiempo de riego en más de un pulso. El *widget* cuenta también con una lista desplegable para poder ver la programación que el agricultor ha realizado en los distintos sectores y fincas.



Figura 7. APP de Irri-Fresa.

#### 4- Conclusiones

Irri-Fresa proporciona al sector del cultivo de la fresa una herramienta fácil y rápida para obtener una programación de riego óptima y actualizada por semanas y personalizada por cada usuario. Esta aplicación, actualmente, está siendo usada satisfactoriamente por diversos productores de la zona, obteniendo ahorros significativos de agua, ayudando a concienciar al sector fresero de la importancia de conocer y optimizar sus consumos de agua.

#### 5- Bibliografía

Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes D.; Smith, M. (2006). "Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos". Estudio FAO Riego y drenaje 56.



- Bartlett, A.C., Andales, A.A., Arabi, M., Bauder, T.A., 2014. A smartphone app to extend use of a cloud-based irrigation scheduling tool. *Computer and electronics in Agriculture*. 111, 127-130.
- Bergez, J.E., Debaeke, P., Deumier, J.M., Lacroix, B., Leenhardt, D., Leroy, P., Wallach, D., 2001. MODERATO: an object-oriented decision tool for designing maize irrigation schedules. *Ecol. Model*, 137 (1), 43-60.
- Bralts, V.F. and Kesner, C.D. 1983. Drip irrigation Field Uniformity Estimation. *Transactions of the Amer. Soc. Ag. Eng.* 26(5):1369-1374.
- Dukes, M.D., Scholberg, J.M., 2004. Automated subsurface drip irrigation based on soil moisture. In: ASAE Paper No. 052188.
- Evelt, S.R., Peters, R.T., Howell, T.A., 2006. Controlling water use efficiency with irrigation automation: cases from drip and center pivot irrigation of corn and soybean. In: Southern Conservation Systems Conference, Amarillo, TX.
- Fereres, E., Orgaz, F., Gonzalez-Dugo, V., 2011. Reflections on food security under water scarcity. *J. Exp. Bot.* 62, 4079-4086.
- Fundación Doñana 21, 2006. Manual de Buenas Prácticas Agrarias Sostenibles. In: De la Agricultura al desarrollo Rural Sostenible, Available at <http://www.donana.es/wp-content/uploads/2013/01/Manual-Buenas-practicas-agrarias-sostenibles.pdf>.
- Hunt, C.E., 2004. *Thirsty Planet e Strategies for Sustainable Water Management*. Zed Books, New York.
- Klocke, N., Stone, L., Bolton, D., 2009. Irrigation scheduling for deficit irrigation. *World Environ. Water Res. Cong.* 2009, 1-9.
- Martín Arroyo, M., 2013. Influencia del Riego en la Sostenibilidad del Uso del Agua en el Cultivo de la Fresa en el Entorno del Parque Nacional de Doñana. (Influence of irrigation on water use sustainability in strawberry cultivation in the surroundings of Doñana National Park). Degree dissertation. UCO.
- Meron, M.R., Hallel, R., Shay, G., Feuer, R., 1996. Soil-sensor actuated automatic drip irrigation of cotton. In: *Proceedings International Conference on Evapotranspiration and Irrigation Scheduling*, November, San Antonio, TX, pp. 886-892.
- Phene, C.J., Howell, T.A., 1984. Soil sensor control of high-frequency irrigation systems. *Trans. ASAE* 27 (2), 392-396.
- Rodríguez Díaz, J.A., Weatherhead, E.K., Knox, J.W., Camacho, E., 2007. Climate change impacts on irrigation water requirements in the Guadalquivir river basin in Spain. *Reg. Environ. Change* 7, 149-159.
- Rossman, L.A. (2000). "EPANET: User Manual. Risk Reduction Engineering Laboratory Office of Research and Development". United States Environmental Protection Agency. Cincinnati, OH.





- Shannon, E.L., McDougall, A., Kelsey, K., Hussey, B., 1996. Watercheck—a coordinated extension program for improving irrigation efficiency on Australian cane farms. In: Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Technol, pp. 113–118, 18.
- Smith, R.J., Baillie, J.N., McCarthy, A.C., Raine, S.R., Baillie, C.P., 2010. Review of Precision Irrigation Technologies and their Application. National Centre of Engineering in Agriculture, University of Southern Queensland, Toowoomba NCEA Publication 1003017/1.
- Wanjura, D.F., Upchurch, D.R., Mahan, J.R., 2004. Establishing differential irrigation levels using temperature–time thresholds. Appl. Eng. Agric. 20 (2), 201–206.
- WWF. (2009) Manual de buenas prácticas de riego. Propuestas de WWF para un uso eficiente del agua en la agricultura. Viñedo, Olivar, Cítricos y Fresa. Madrid. Spain.



## GESTIÓN ÓPTIMA DE REDES DE RIEGO MEDIANTE EL CONTROL DE LA OPERACIÓN DE LOS PUNTOS CRÍTICOS

*Fernández García, I.<sup>1</sup>, González Perea, R.<sup>1</sup>, Rodríguez Díaz, J.A.<sup>1</sup>., Moreno, M.A.<sup>2</sup>, Montesinos, P.<sup>1</sup>, Camacho Poyato, E.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Departamento de Agronomía. Universidad de Córdoba. Campus Rabanales, Edif. Da Vinci, 14071. Córdoba. E-mail: [g52fegai@uco.es](mailto:g52fegai@uco.es), [g72goper@uco.es](mailto:g72goper@uco.es), [jarodriguez@uco.es](mailto:jarodriguez@uco.es), [pmontesinos@uco.es](mailto:pmontesinos@uco.es), [ecamacho@uco.es](mailto:ecamacho@uco.es)

<sup>2</sup> Centro Regional de Estudios del Agua, Universidad de Castilla-La Mancha, 02071, Albacete. E-mail: [miguelangel.moreno@uclm.es](mailto:miguelangel.moreno@uclm.es)

### Resumen

La necesidad de disminuir los costes energéticos que los agricultores tienen que afrontar tras la modernización de los sistemas de distribución del agua, está llevando a un aumento de la demanda de estrategias encaminadas a reducir el consumo de este recurso. En este trabajo se propone una metodología fundamentada en la optimización de la altura manométrica en la estación de bombeo y el control de la operación de los puntos críticos con el fin de disminuir la demanda energética de la red, asegurando una presión mínima en los hidrantes operativos. La estrategia considera dos escenarios de gestión: escenario A, en el que se determina la altura manométrica óptima considerando un 100 % de simultaneidad de hidrantes; y escenario B, en el que se determina la altura manométrica óptima cuando los hidrantes críticos (identificados previamente) se desactivan. La metodología se ha aplicado en los 11 sectores que componen la comunidad de regantes del Bembézar Margen Derecha, determinando una reducción en la altura manométrica óptima entre los escenarios A y B de 12 m y 13 m en dos sectores seleccionados como representativos. Esta reducción en la altura manométrica se traduce en un ahorro energético potencial de 23.2 % y 25.8 % en los sectores analizados. La adopción del escenario A en las horas en las que el precio de la energía es mayor y la aplicación del escenario B sin restricciones horarias pueden suponer importantes ahorros en el coste energético.

### 1-Introducción

Según la FAO, la escasez de agua se produce cuando “*la demanda supera el suministro de agua dulce en un área de determinada*” (FAO 2013). Teniendo en cuenta que la población mundial continúa aumentando y se espera que alcance los 9000 millones de personas en 2050, es indiscutible que la presión sobre los recursos hídricos se incrementará.

Entre los sectores económicos, la agricultura es responsable del 70 % de las extracciones de agua dulce en el mundo (FAO 2013). Mediante la expansión de la agricultura de regadío, se ha conseguido aumentar y garantizar las producciones agrícolas en muchas regiones. De esta forma, el riego tendrá un papel clave a la hora de asegurar la producción de alimentos para ese aumento de población. Se estima que para satisfacer la demanda de la población en 2050, la producción de alimentos tendrá que aumentar un 60 % (FAO 2013). Por tanto, la agricultura tendrá que adaptarse para satisfacer esa mayor demanda con un recurso cada vez más escaso.

Una de las actuaciones que se han llevado a cabo para mejorar la gestión de este recurso ha consistido en la transformación de las infraestructuras de distribución del agua mediante canales abiertos hacia redes a presión, lo que ha supuesto un aumento de la eficiencia en la distribución del agua (MAPA 2001, MARM 2006). Por otro lado, las nuevas redes a presión han favorecido el cambio hacia sistemas de riego más eficientes, como el goteo o la aspersión, que implican una mejora adicional de la gestión del agua aumentando la eficiencia de aplicación en parcela (Carrillo Cobo *et al.* 2011). Sin embargo, este proceso de modernización ha traído consigo un aumento de las necesidades energéticas, lo que unido al incremento del precio de este recurso, justifica la necesidad de desarrollar estrategias encaminadas a mejorar la gestión de este recurso.

Varios autores han desarrollado estrategias que permiten mejorar la eficiencia energética en las redes de riego a presión. Algunas de ellas se fundamentan en la gestión de la red de riego en sectores mediante el establecimiento de turnos de riego (Jiménez Bello *et al.* 2010), en el control de la operación de los puntos críticos (Rodríguez Díaz *et al.* 2012) o en la optimización del funcionamiento de la estación de bombeo (Moreno *et al.* 2007). Mediante la aplicación de estas medidas, se han alcanzado ahorros energéticos que oscilan entre el 10 % y el 36 % en las redes de riego analizadas.

El impacto del aumento de las tarifas energéticas en la factura eléctrica es cada vez mayor por lo que en otros trabajos se ha considerado la optimización de la gestión de la red de riego teniendo en cuenta, además, la optimización del coste energético mediante la incorporación de la tarifa energética (Fernández García *et al.* 2014).

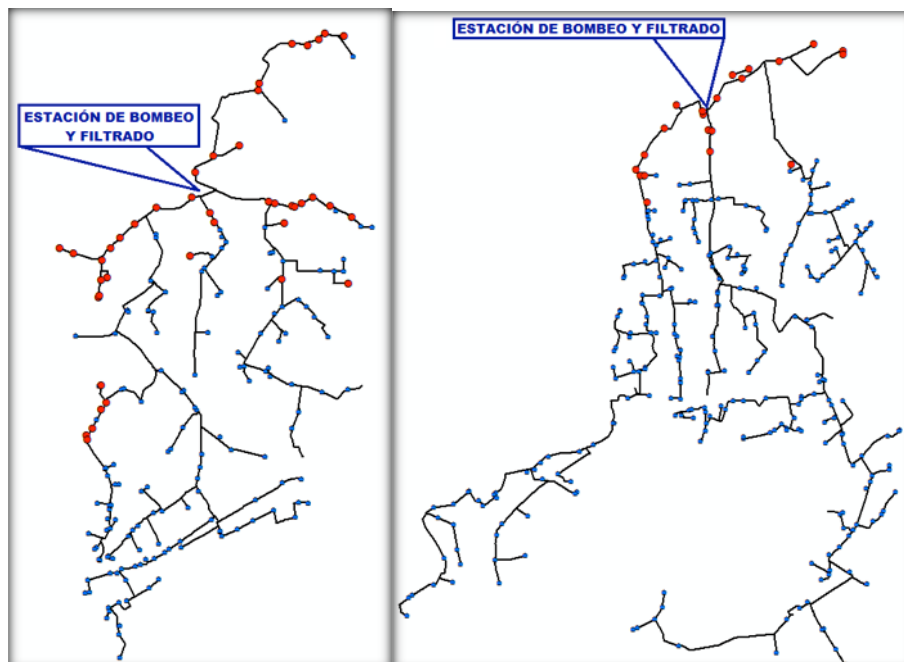
En este trabajo se propone una nueva estrategia de gestión de redes de riego, enfocada a la disminución del consumo de energía, fundamentada en la restricción de las horas disponibles para riego en los puntos críticos en periodos de tarificación punta.

## 2- Metodología

### 2.1.- Zona de estudio

La comunidad de regantes Bembézar Margen Derecha se sitúa entre las provincias de Sevilla y Córdoba y cuenta con una superficie regada de aproximadamente 12.000 ha, en las que en torno al 50 % se dedican al cultivo de cítricos. Los sistemas de distribución del agua en esta comunidad de regantes se han modernizado en los últimos años y actualmente posee una red de riego a presión que abastece a 11 sectores independientes, organizados a la demanda (Figura 1).

La red se diseñó para suministrar  $1,25 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}$  con una presión mínima de funcionamiento en hidrante de 35 m.c.a. En la actualidad, las estaciones de bombeo de sus 11 sectores operan mediante una regulación dinámica de presión y las bombas se activan secuencialmente con el fin de mantener una presión de consigna. A la salida de cada estación de bombeo se encuentra un filtro cuyas pérdidas de carga son de 5 m.c.a.



**Figura 1.** Representación esquemática de las redes de distribución de dos sectores (IX (izquierda) y X (derecha)), seleccionados para el análisis de resultados.

## 2.2.- Escenarios de gestión

Dos escenarios de gestión de redes de riego se han considerado para reducir la demanda de potencia,  $P$  (kW), (ecuación 1) de la red de distribución de agua:

$$P = \frac{1}{1000} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \gamma \cdot Q \cdot H \quad [1]$$

Siendo  $\eta$  el rendimiento de la estación de bombeo,  $\gamma$  el peso específico del agua ( $\text{Nm}^{-3}$ ),  $Q$  el caudal demandado por la red ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ) y  $H$  la altura manométrica necesaria para satisfacer la presión de servicio en todos los hidrantes (m)

- Escenario A. Determinación del funcionamiento óptimo de la estación de bombeo considerando que todos los hidrantes riegan a la vez, garantizando una presión mínima de 35 m.c.a en cada hidrante.
- Escenario B. Optimización del funcionamiento de la estación de bombeo considerando que todos los hidrantes, excepto aquéllos identificados como puntos críticos, riegan simultáneamente. Los hidrantes críticos son aquellos que bien por su altura o su distancia con respecto a la estación de bombeo poseen requerimientos de energía elevados. Este escenario se fundamenta en evitar que los hidrantes críticos rieguen durante las horas en las que el precio de la energía es mayor. Al igual que en el escenario A, se garantiza una presión de 35 m.c.a. en todos los hidrantes que no actúan como críticos.

## 2.3.- Modelización de la estación de bombeo

La modelización de estaciones de bombeo consiste en simular el comportamiento de la estación de bombeo en distintos escenarios de manejo de la misma. Estos escenarios de

manejo son, principalmente, la presión de consigna de la estación de bombeo y la secuencia de activación de bombas de velocidad fija y velocidad variable.

Con este modelo de simulación se puede determinar el tipo de regulación de la estación de bombeo que minimiza el consumo energético, y por lo tanto, el coste de operación del sistema, garantizando las condiciones de demanda de la red de riego.

El modelo de simulación de estaciones de bombeo requiere la siguiente información:

- Curvas características de las distintas bombas que componen la estación de bombeo, obtenidas de los catálogos de las bombas.
- Número de bombas activadas con un variador de velocidad y número de bombas fijas, según la instalación existente.
- Secuencia de activación de bombas variables y fijas, según la secuencia actual o variando la frecuencia para minimizar el consumo energético global.
- Rendimiento del motor de las bombas. En caso de no tener datos a este respecto, se pueden obtener rendimientos de bombas de semejante potencia y calidad.
- Rendimiento del variador de velocidad que activan las bombas de velocidad variable, quizá el parámetro más difícil de obtener en una estación de bombeo por la dificultad en la medida aguas arriba y aguas abajo del variador, con equipos de alta precisión y con necesidad de sincronismo de los equipos. Para considerar este rendimiento, se pueden utilizar curvas de rendimiento estandarizadas dependiendo de la potencia de la bomba y la capacidad del propio variador.

A partir de los datos de entrada, se ha desarrollado un modelo de simulación de estaciones de bombeo que reproduce el comportamiento de todas las bombas que conforman la estación para diferentes secuencias de activación. El modelo tiene en cuenta un intervalo para el caudal suministrado de  $25 \text{ l min}^{-1}$  y la presión necesaria para cada valor de caudal. Por último, para cada par de valores Q-H se determina la eficiencia de bombeo en función de la secuencia de activación de las bombas.

El resultado del modelo es una matriz en la que se puede determinar el rendimiento de la estación de bombeo para cada binomio Q-H y para cualquier tipo de regulación y presión de consigna (matriz Q-H- $\eta$ ). El modelo de simulación de la estación de bombeo se ha desarrollado en MaTLab (Pratap 2010).

#### 2.4.- Optimización del funcionamiento de la estación de bombeo

A partir de la matriz Q-H- $\eta$  obtenida mediante la modelización de la estación de bombeo, este algoritmo permite determinar para cada caudal (condicionado por el número de hidrantes abiertos), la altura manométrica y la eficiencia de bombeo que minimiza la ecuación 1 y, al mismo tiempo, garantiza la presión de servicio en hidrante. La demanda base de cada hidrante,  $q_h \text{ (l s}^{-1}\text{)}$ , se determina mediante la siguiente expresión:

$$q_h = q_s \cdot S_h \quad [2]$$

Siendo  $q_s$  el caudal de diseño del hidrante ( $1.2 \text{ l s}^{-1}\text{ha}^{-1}$ ) y  $S_h$  (ha) la superficie asociada a cada hidrante.

El algoritmo se ha desarrollado en MaTLab, diferenciando entre los siguientes escenarios:



- Escenario A. En este escenario se determina la presión mínima en la estación de bombeo que garantiza la presión de servicio en todos los hidrantes, considerando la operación simultánea de los mismos. La demanda base de cada hidrante se introduce en un modelo hidráulico de la red, el simulador EPANET (Rossman 2000), obteniendo de esta simulación la altura manométrica necesaria en la estación de bombeo para satisfacer la presión de servicio en todos los hidrantes. El caudal demandado en la red (suma de la demanda base de todos los hidrantes) y la altura manométrica obtenida mediante el simulador hidráulico son datos de entrada en la matriz Q-H- $\eta$ . Como resultado, la matriz proporciona la altura manométrica que implica una demanda de potencia mínima y que garantiza el caudal demandado y la presión requerida en hidrante. La altura manométrica obtenida en la matriz será siempre igual o mayor a la altura manométrica obtenida en el simulador hidráulico.

- Escenario B. El análisis del escenario B contempla varias etapas. En primer lugar y al igual que en el escenario A, se parte de la operación simultánea de todos los hidrantes, determinando la altura manométrica y la eficiencia de bombeo que minimizan la ecuación 1. De esta primera simulación se obtiene, además, el hidrante crítico, que es el hidrante que recibe una presión menor. En la siguiente etapa se desactiva el hidrante crítico detectado en la primera simulación y se procede de la misma manera: con la demanda base de todos los hidrantes excepto el hidrante crítico se determina en EPANET la altura manométrica óptima que garantiza la presión requerida en todos los hidrantes operativos. A partir del caudal demandado y la altura manométrica determinada en EPANET, se obtiene de la matriz Q-H- $\eta$  la altura manométrica y la eficiencia de bombeo que minimizan la ecuación 1. Así, se obtiene un nuevo par de valores Q-H en la estación de bombeo y el siguiente hidrante crítico. El procedimiento continúa con la desactivación del hidrante crítico detectado y una nueva simulación. De esta forma, en cada simulación, se detecta y desactiva un nuevo hidrante crítico y se obtiene una altura manométrica óptima.

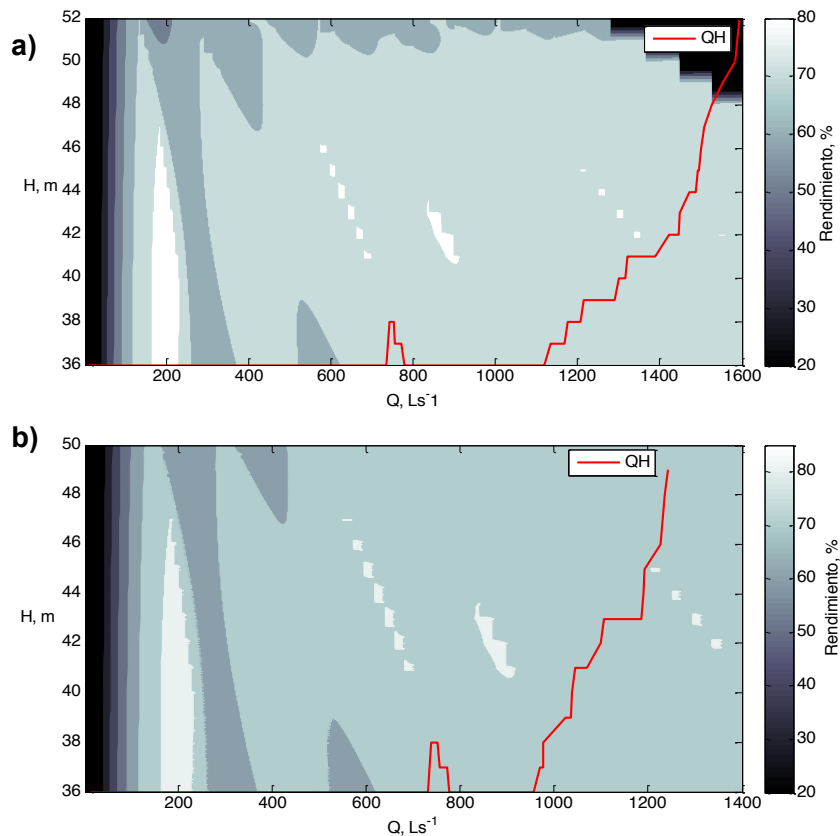
El modelo se repite hasta un número de veces igual al número de hidrantes menos 1, lo que permite determinar el número óptimo de hidrantes que no deben regar en las horas en las que el precio de la energía es mayor y la altura manométrica óptima cuando riega el grupo de hidrantes no identificados como críticos.

### **3- Resultados y Discusión**

#### **3.1.- Modelización de la estación de bombeo**

La metodología descrita se ha aplicado a cada uno de los 11 sectores que conforman la comunidad de regantes del Bembézar Margen Derecha, aunque sólo los sectores IX (1262 ha) y X (1007 ha) se han seleccionado para el análisis de resultados.

La figura 2 muestra el resultado de la aplicación del modelo de simulación de estación de bombeo para los sectores IX (a) y X (b). El rango de operación de la estación de bombeo del sector IX se sitúa entre 36 m y 52 m con una demanda máxima de caudal de 1600 l s<sup>-1</sup>. El rango de operación de la estación de bombeo del sector X varía entre 36 m y 50 m y el caudal máximo demandado en esta red es 1400 l s<sup>-1</sup>. En esta figura se observa que para caudales altos (superiores a 600 l s<sup>-1</sup>), las eficiencias de bombeo son altas para todo el rango de alturas manométricas analizadas. Sin embargo, el rendimiento es bajo cuando el caudal disminuye, aunque en ambos sectores se observan rendimientos en torno al 80 % para caudales próximos a 200 l s<sup>-1</sup>.



**Figura 2.** Modelización de la estación de bombeo de los sectores IX (a) y X (b) y curva Q-H obtenida.

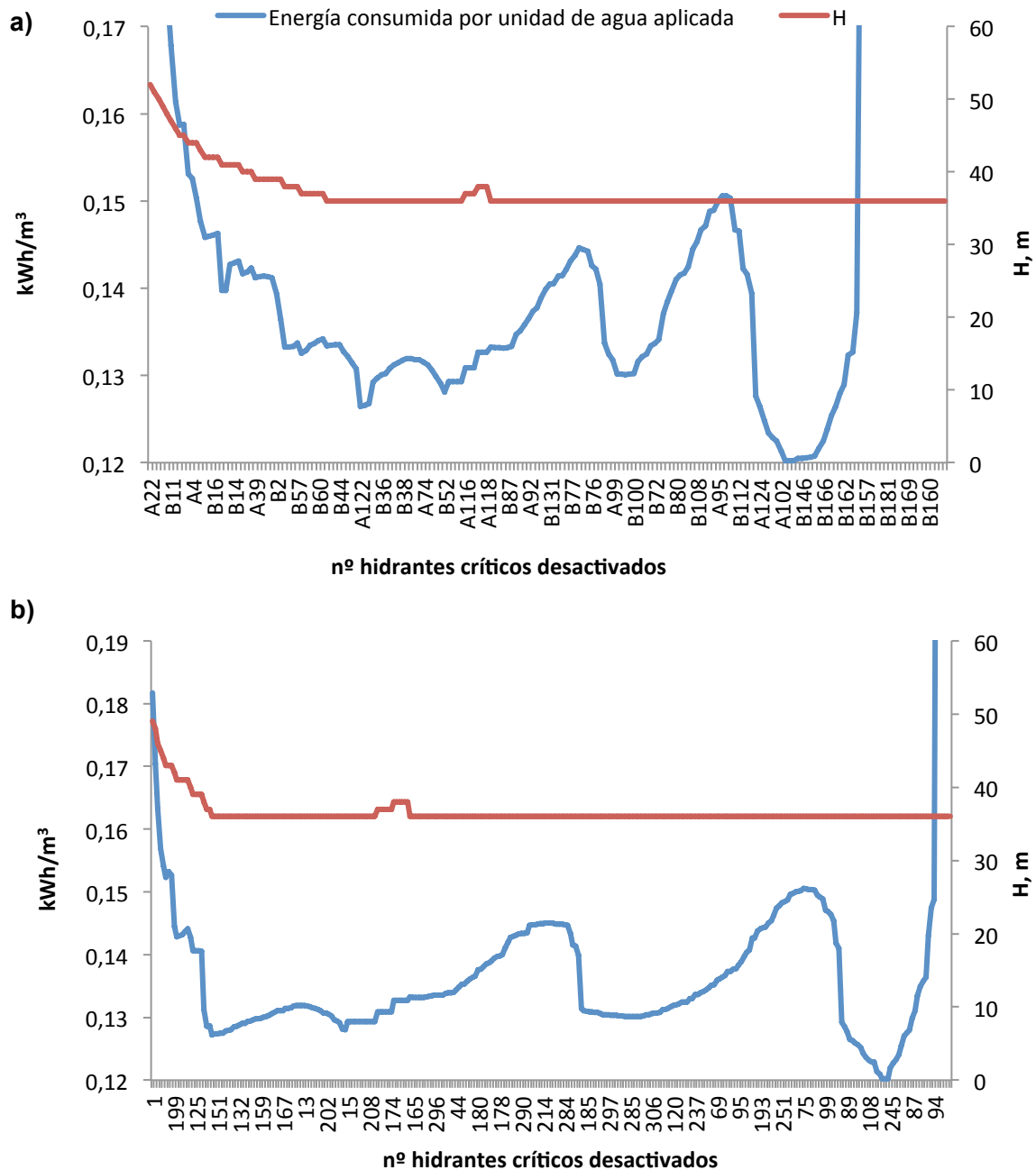
### 3.2.- Escenarios de gestión y estimación de ahorros

La figura 3 muestra la altura manométrica óptima en función del número de hidrantes operativos para los sectores IX (a) y X (b).

En el sector IX (Figura 3.a) se observa una reducción importante de la altura manométrica, desde 48 m hasta alcanzar un valor mínimo de 36 m tras desactivar 42 hidrantes. El valor de 48 m se corresponde con la altura manométrica óptima para el escenario A. Sin embargo, en este sector no es posible la operación simultánea de todos los hidrantes ya que la estación de bombeo no es capaz de suministrar el par de valores Q-H requerido para un 100 % de simultaneidad. Esto se observa en la figura 2.a, en la cual la línea que representa la curva Q-H se encuentra en una zona de colores oscuros (parte superior derecha) cuando se considera que todos los hidrantes están abiertos. En este caso el escenario A implica el funcionamiento de todos los hidrantes excepto 4 hidrantes críticos. En este escenario, la estación de bombeo trabaja con una eficiencia de bombeo del 75 % y el consumo de energía por unidad de volumen de agua aplicada es  $0.174 \text{ kWh m}^{-3}$  (Figura 3.a).

El escenario B contempla la operación de todos los hidrantes salvo los 42 hidrantes críticos detectados. En este caso, la altura manométrica óptima es 36 m, lo que se corresponde con una eficiencia en la estación de bombeo del 75 %. En este escenario, la

energía consumida por unidad de agua aplicada se estima en 0.133 kWh m<sup>-3</sup> (Figura 3.a). Por tanto, el escenario B supone un ahorro del 23.2 % con respecto al escenario A.



**Figura 3.** Energía consumida por unidad de agua aplicada y altura manométrica óptima en función del número de hidrantes críticos desactivados en los sectores IX (a) y X (b).

En el sector X, el valor mínimo de altura manométrica, 36 m, se alcanza tras desactivar 22 hidrantes críticos (Figura 3.b). En el escenario A, la altura manométrica óptima es 49 m, alcanzando en estas condiciones una eficiencia en el bombeo del 73 % (Figura 2.b). En el escenario B, la altura manométrica óptima cuando los 22 hidrantes críticos detectados no están funcionando es 36 m, lo que conlleva un rendimiento del 77 %. El consumo de energía por unidad de volumen de agua aplicada en el escenario A es 0.182

kWh m<sup>-3</sup> mientras que en el escenario B es 0.127 kWh m<sup>-3</sup>, lo que supone un ahorro del 25.8 %.

El escenario B en ambos sectores contempla la adopción de la altura manométrica óptima en la estación de bombeo y la desactivación de 42 hidrantes (sector IX) y 22 hidrantes (sector X). Sin embargo, es posible seleccionar otras estrategias en las que la altura manométrica óptima no sea la mínima detectada pero no sea necesario desactivar todos los hidrantes críticos, lo que se correspondería con valores intermedios entre el escenario A y el B.

#### 4.- Conclusiones

El aumento de las necesidades energéticas en las redes de riego a presión, junto con el incremento en el precio de este recurso obliga al desarrollo de estrategias que permitan reducir el consumo y el coste de energía.

En este trabajo se ha propuesto una estrategia de minimización de las necesidades energéticas en redes de riego definiendo dos escenarios de gestión: escenario A, en el que se determina la altura manométrica óptima en la estación de bombeo considerando un 100 % de simultaneidad de hidrantes; y escenario B, en el que se determina la altura manométrica óptima considerando que los hidrantes críticos no están activos. Ambos escenarios garantizan la presión de servicio en los hidrantes operativos. De esta forma, el escenario A sólo podría operar durante las horas en las que el precio de la energía es menor mientras que el escenario B no tendría restricciones de funcionamiento.

La metodología propuesta se ha aplicado a los 11 sectores que conforman la comunidad de regantes de Bembézar Margen Derecha. En los dos sectores seleccionados como representativos, se ha obtenido una reducción en la altura manométrica óptima entre los escenarios A y B de 12 m y 13 m en los sectores IX y X, respectivamente, lo que se traduce en un ahorro potencial de 23.2 % y 25.8 % en los sectores IX y X.

Los dos escenarios propuestos suponen estrategias de gestión fáciles de adoptar: condicionar el funcionamiento de los hidrantes críticos para que operen en las horas en las que el precio de la energía es menor y flexibilizar la operación de aquellos hidrantes que no actúan como críticos para que puedan regar en cualquier momento del día.

#### 9- Bibliografía

- Carrillo Cobo M.T., Rodríguez Díaz J.A., Montesinos P., López Luque R., Camacho Poyato E. (2011). Low energy consumption seasonal calendar for sectoring operation in pressurized irrigation networks. *Irrigation Science* 29 (2): 157-169.
- FAO (2013) Afrontar la escasez de agua. Un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Roma.
- Fernández García, I., Rodríguez Díaz J.A., Montesinos P., Camacho Poyato E. (2014). Optimización del coste energético en redes de riego a presión con varios puntos de suministro. XXXII Congreso Nacional de Riegos. Madrid.
- Jiménez Bello M.A., Martínez Alzamora F., Bou Soler V., Bartolí Ayala H.J. (2010) Methodology for grouping intakes of pressurised irrigation networks into sectors to minimise energy consumption. *Biosyst Eng* 105:429–438
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, MAPA, (2001). Plan Nacional de Regadíos. Horizonte 2008. Madrid.



- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, MARM, (2006). Plan de Choque de Modernización de Regadíos. Madrid
- Moreno M.A., Carrión P., Planells P., Ortega J.F., Tarjuelo J.M. (2007). Measurement and improvement of the energy efficiency at pumping stations. *Biosyst. Eng.* 98,479–486.
- Pratap R. 2010. *Getting started with Matlab. A quick introduction for Scientist and Engineers.* Oxford University Press. USA.
- Rodríguez Díaz J.A., Montesinos P., Camacho Poyato E. (2012). Detecting Critical Points in On-Demand Irrigation Pressurized Networks – A New Methodology. *Water Resour Manage.* DOI 10.1007/s11269-012-9981-8.
- Rossman L.A. 2000. *EPANET 2. Users manual.* US Environmental Protection Agency (EPA). USA.





## **BANCO DE ELECTROVÁLVULAS DEL CENTER Y ESTUDIO COMPARATIVO DE DOS MODELOS DE ELECTROVÁLVULA SOMETIDAS A DIFERENTES PRESIONES, TENSIONES Y TEMPERATURAS**

*Cervantes Díaz-Toledo, A. (1) (P)*

<sup>1</sup> Ingeniero Técnico en Informática de Gestión, Asistencia Técnica del Centro Nacional de Tecnología de Regadíos (CENTER), Camino de la Vega s/n, 28830 San Fernando de Henares, [acervant@tragsa.es](mailto:acervant@tragsa.es)

### **Resumen**

El telecontrol supone un factor importante para lograr un equilibrio entre la demanda y el gasto de agua, porque centraliza y gestiona la información del consumo realizado en cada superficie de riego. Que un telecontrol funcione correctamente no sólo depende del equipo remoto, sino que también influyen los diferentes sensores y actuadores que hacen que todo funcione en conjunto. Uno de los actuadores más importantes es la electroválvula (solenoides) puesto que es el factor fundamental a la hora de realizar un riego. Por este motivo desde el Laboratorio Central para Ensayo de Materiales y Equipos de Riego del CENTER se ha desarrollado un nuevo banco destinado a probar los diferentes tipos de electroválvulas existentes en el mercado. El banco dispone de dos circuitos cerrados de agua, uno para agua limpia y otro para agua con partículas en suspensión donde poder ensayar solenoides de dos o tres hilos, biestables o monoestables, con diferentes tensiones de alimentación y ancho de pulso. Como aplicación directa para el banco se realizó en colaboración con la empresa Bürkert, un estudio comparativo de dos modelos de electroválvulas. El ensayo pretendía verificar su comportamiento sometiéndolas a diferentes temperaturas (tanto de agua como del equipo), presiones y tensiones.

### **Abstract**

Remote monitoring and control system is a major factor in order to reach an equilibrium between water demand and water consumption as it centralizes and manages the consumption data coming from each irrigation area. A remote monitoring and control system will work properly not only because of the remote equipment but also due to the different sensors and actuators that help that everything works as a single unit. One of the most important actuators is the solenoid valve as it is the key component when irrigating. For this reason, the CENTER laboratory has developed a new test bench designed to test the different types of electric valves in the market. The test bench has two closed water circuits, one for clean water and another one for water with suspended particles that allow testing of two or three wire solenoids, bistable or monostable, with different supply voltages and pulse band. As a direct application for the bench, the CENTER, in collaboration with Bürkert, has carried out a comparative study of two different models of Solenoid valves. The test is aimed at verifying their performance through variable temperatures (water and equipment temperatures), pressures and voltages.

## 1) Introducción

El agua es un bien escaso y como tal se tiene que gestionar de una manera eficiente. Uno de los objetivos más importantes para el telecontrol de regadíos es el control y ahorro sustancial en el consumo del agua. Para poder realizar esta labor, se necesita que todos los elementos que influyen en la realización de un riego como válvulas, sensores, actuadores, equipos remotos y demás elementos funcionen correctamente.

Aunque el telecontrol está suponiendo un avance y una mejora para las Comunidades de Regantes, es cierto también que están surgiendo ciertos problemas en las instalaciones relacionados de forma directa o indirecta con las electroválvulas, como son:

- Atasco y deterioro del solenoide, por el salitre y agua turbia.
- Mala elección del cableado que acciona el solenoide.
- Largas distancias de separación entre la remota y la propia electroválvula.
- Elección errónea de los sistemas de telecontrol o de las válvulas hidráulicas para un solenoide específico.
- Falta de mantenimiento.
- Problemas con los microtubos conectados a los solenoides.
- Corta duración del pulso de accionamiento.
- Problemas de obsolescencia por los diferentes cambios de temperatura que se producen a lo largo del año en el campo.

El estudio y verificación del funcionamiento de las diferentes electroválvulas, es esencial en la elección idónea de estos elementos para determinar cuáles son los más acertados a la hora de implantarlos en los distintos proyectos e instalaciones. Por esta razón el equipo técnico del CENTER decidió desarrollar un banco de electroválvulas, donde poder caracterizar y verificar el correcto funcionamiento de las mismas.

Como carácter añadido al nuevo banco y como aplicación práctica, se decidió realizar un estudio comparativo de dos modelos diferentes de electroválvulas (6014 y 6027) de la empresa Bürkert con las mismas características técnicas pero con algún cambio en el diseño. El ensayo surgió debido a los problemas que se presentaban en una de las obras donde se habían instalado las electroválvulas del modelo 6027. Al sustituir estos elementos por el modelo 6014 el problema se solventaba. Por esta razón, la empresa Bürkert decidió realizar el estudio comparativo de los dos modelos, para poder determinar en qué términos se producían los fallos de apertura y cierre de los equipos.

Los **objetivos** del trabajo son principalmente:

- Dar a conocer el nuevo banco de electroválvulas desarrollado, poniendo de manifiesto las características del mismo y los ensayos que se pueden realizar a los equipos.
- Verificar el correcto funcionamiento de los dos modelos de solenoides especificados, sometiéndolos a las mismas pruebas de apertura y cierre con diferentes presiones, tensiones y temperaturas tanto ambientales como del agua.
- Elaboración de un protocolo de ensayo para caracterizar las electroválvulas y que servirá como apoyo a la normativa de telecontrol.

## 2) Materiales y métodos

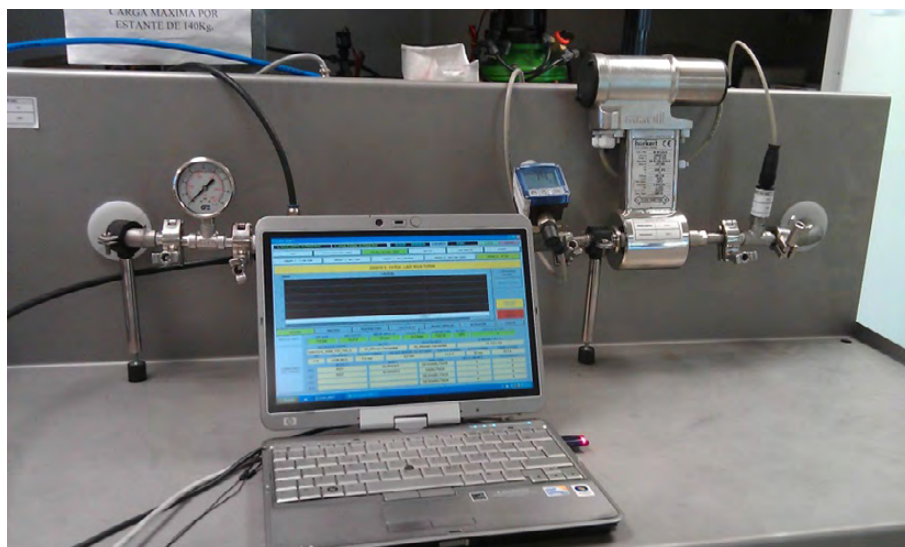
### 2.1) Banco de Electroválvulas

Las pruebas se realizaron en el Laboratorio Central para Ensayo de Materiales y Equipos de Riego del CENTER, donde se determinan o comprueban las características técnicas de los elementos de riego. Para realizar este estudio se empleó el nuevo banco de electroválvulas. Dicho banco, mostrado en la figura 1, consta de dos circuitos cerrados de agua, donde poder ensayar hasta cuatro solenoides a la vez en cada circuito. De forma continua se registran tanto las actuaciones realizadas como diferentes datos de actuación, temperatura, caudal, tensión o presión.



**Figura 1** – Banco de electroválvulas

Cada circuito consta de un depósito de agua con una bomba vertical centrífuga, un transductor de presión, un caudalímetro electromagnético y un transductor de temperatura aguas arriba y un manómetro aguas abajo del objeto de ensayo. Estos elementos se muestran en la figura 2.



**Figura 2** – Sensores empleados en el banco de electroválvulas

Uno de los circuitos ha sido diseñado para que circule agua con partículas en suspensión a través de él. Por este motivo se ha instalado un agitador, mostrado en la figura 3, que evite que las partículas se queden en el fondo del depósito.



**Figura 3** – Agitador de partículas y bomba centrífuga

El banco permite realizar ensayos de funcionamiento y fatiga en el siguiente tipo de electroválvulas:

- Electroválvulas de 1/8”/1/4”; 3/2 vías Latch 2 hilos. NA (Normalmente abierta) y/o NC (Normalmente cerrada) en reposo.
- Electroválvulas de 1/8”/1/4”; 3/2 vías Latch 3 hilos común positivo. NA y/o NC en reposo.
- Electroválvulas de 1/8”/1/4”; 3/2 vías Latch 3 hilos común negativo. NA y/o NC en reposo.
- Electroválvulas de 1/8”/1/4”; 3/2-2/2 vías. NA y/o NC en reposo.

Lo que se ha intentado, al diseñar el banco de ensayo, es abarcar la mayoría de tipos de electroválvulas existentes y empleadas para el telecontrol.

Para poder determinar y caracterizar de manera correcta un solenoide, el banco tiene la capacidad de realizar las siguientes pruebas:

- Tiempo mínimo impulso apertura y cierre electroválvula.
- Tensión mínima impulso apertura y cierre electroválvula.
- Presión mínima/máxima impulso apertura y cierre electroválvula.
- Relación presión caudal.
- Ensayo de fatiga.

## 2.2) Características del material objeto de estudio

Para el estudio realizado se ensayaron cinco solenoides facilitados por la empresa Bürkert (tres del modelo 6027 y dos del 6014). Las características de ambos modelos de electroválvulas se muestran en la tabla 1:

**Tabla 1** – Tabla de características de electroválvulas

<i>Tipo de electroválvula</i>	Biestable/Latch
<i>Tensión de alimentación nominal</i>	12 Vcc
<i>Ancho de pulso nominal</i>	50 ms
<i>Rango de presión nominal</i>	0 – 10 bar
<i>Número de vías</i>	3 vías
<i>Número de hilos</i>	2 hilos
<i>Estado en reposo</i>	NA (Normalmente abierta)

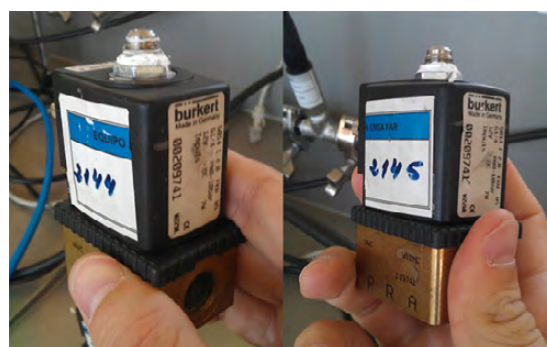
A continuación se muestran los equipos objeto de ensayo:

Modelo 6027 – Con identificación del laboratorio: 2082, 2084 y 2085, mostrados en la figura 4.



**Figura 4** – Electroválvulas 2085, 2084, 2082

Modelo 6014 – Con identificación del laboratorio: 2144 y 2145, mostrados en la figura 5.



**Figura 5** - Electroválvulas 2145, 2144



### 2.3) Ensayos realizados

Para las pruebas se ha empleado el nuevo banco de electroválvulas mencionado. El ensayo comparaba los modelos de solenoides especificados y pretendía verificar si la variación de temperatura, presión y tensión afectaba al funcionamiento de los equipos.

Los valores empleados para realizar los ensayos se muestran en la tabla 2:

**Tabla 2** – Valores empleados para realizar los ensayos

<b>Tensión de disparo (V)</b>	10, 12, 13,2 20, 25
<b>Duración del pulso (ms)</b>	50
<b>Temperatura de la electroválvula (°C)</b>	2, 20, 45
<b>Temperatura del agua (°C)</b>	2, 20, 45
<b>Presión del agua (bar)</b>	2,5, 6, 10

Secuencia de ensayos:

El ensayo consistió en realizar 10 operaciones de apertura y cierre para cada una de las diferentes tensiones, presiones y temperaturas especificadas anteriormente.

La idea al realizar los ensayos, era conseguir la misma temperatura, con una tolerancia de  $\pm 2,5^{\circ}\text{C}$ , tanto para el circuito hidráulico como para la electroválvula. Para alcanzar la temperatura objetivo, se empleó como elemento auxiliar a la prueba una cámara climática, mostrada en la figura 6, donde se introdujo la electroválvula.

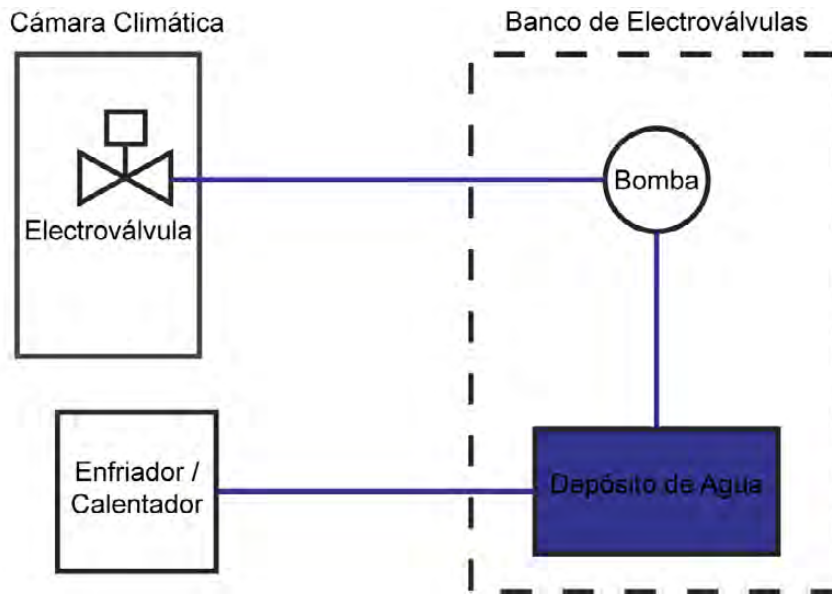
Una vez conectada al banco de solenoides e introducida, la electroválvula objeto de ensayo en el interior de la cámara climática, se configuró a la temperatura necesaria.



**Figura 6** – Cámara climática empleada para conseguir la temperatura objetivo

Para que el circuito hidráulico alcanzase la temperatura adecuada para el ensayo, se empleó un equipo refrigerador/calentador para conseguir temperaturas de 2 °C, 20 °C y 45 °C. La figura 7 muestra la instalación empleada para la realización de los ensayos.

Para garantizar el correcto funcionamiento de las electroválvulas se aseguraba que existiera una diferencia de presión entre aguas arriba y aguas abajo del solenoide en el momento de su apertura o cierre. Si no realizaba la maniobra de forma correcta, no se producía una diferencia de presión y por lo tanto, la prueba se consideraba negativa.



**Figura 7 – Esquema de instalación realizada**

Ninguna de las pruebas se iniciaba hasta que no se alcanzaba la temperatura objetivo, dentro de la tolerancia especificada, tanto en el interior de la cámara climática como en el circuito hidráulico. Desde el programa del autómatas se configuraban los parámetros de ancho de pulso, tensión, y presión para realizar los ensayos.

La prueba se consideró negativa si al enviar una orden de apertura o de cierre, el solenoide no era capaz de realizar la operación en el primer intento, siendo necesario realizar varios reintentos hasta que se consiguiese accionar.

### 3) Resultados y discusión

En cuanto a la aplicación práctica del estudio realizado de la comparativa de los modelos de electroválvulas 6014 y 6027 de la empresa Bürkert, se ha determinado que el resultado del ensayo ha sido satisfactorio para el modelo 6014 mientras que el modelo 6027 ha presentado anomalías en su funcionamiento.

En la tabla 3, se muestra a modo de resumen los resultados de todos los ensayos realizados a las electroválvulas:

**Tabla 3 –** Tabla de características de electroválvulas

Tensión (V)	Temperatura (°C)	Temperatura agua (°C)	Presión (bar)	Modelo 6027						Modelo 6014			
				2082		2084		2085		2144		2145	
				Apertura	Cierre	Apertura	Cierre	Apertura	Cierre	Apertura	Cierre	Apertura	Cierre
10,8	2	7,4-9,5	2	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
			5	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
			10	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	SI	SI	SI
	20	21,5 - 23,2	2	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
			5	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	
			10	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	SI	SI	
	45	35,8 - 38,7	2	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
			5	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	
			10	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	SI	SI	
12	2	7,4-9,5	2	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
			5	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	
			10	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	SI	SI	
	20	21,5 - 23,2	2	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
			5	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	
			10	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	SI	SI	
	45	35,8 - 38,7	2	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
			5	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	
			10	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	SI	SI	
13,2	2	7,4-9,5	2	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
			5	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	
			10	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	SI	SI	
	20	21,5 - 23,2	2	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
			5	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	
			10	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	SI	SI	
	45	35,8 - 38,7	2	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
			5	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	
			10	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	SI	SI	
20	2	7,4-9,5	2	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
			5	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	
			10	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	SI	SI	
	20	21,5 - 23,2	2	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
			5	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	
			10	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	SI	SI	
	45	35,8 - 38,7	2	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
			5	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	
			10	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	SI	SI	
25	2	7,4-9,5	2	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
			5	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	
			10	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	SI	SI	
	20	21,5 - 23,2	2	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
			5	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	
			10	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	SI	SI	
	45	35,8 - 38,7	2	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
			5	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	
			10	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	SI	SI	

Como se puede ver para el modelo 6027 los resultados a 10 bares de presión han sido negativos para los cierres. Para poder determinar exactamente a partir de qué presión las electroválvulas comienzan a fallar, se decidió aumentar desde los 5 bares hasta los 10 bares la presión en pasos de 0,5 bares. Tras realizar los mismos ensayos que en la tabla anterior, con las mismas tensiones y temperaturas, se determinó que el error se produce para presiones iguales o superiores a 6 bares.

#### 4) Conclusiones y recomendaciones

Los equipos 2144 y 2145, modelo 6014, cumplen con el comportamiento tipo de una electroválvula. Las electroválvulas han realizado todas las órdenes de apertura y cierre pedidos.

Se observa que su funcionamiento ha sido correcto y no se ha visto afectado por las diferentes temperaturas (2, 20 y 45°C), tensiones de disparo (10,8 – 25 V), ni presiones (2, 5 y 10 bar) con 50 ms de ancho de pulso.



En cambio, los equipos 2082, 2084 y 2085, modelo 6027, no cumplen con el comportamiento tipo de un solenoide. No realizan los cierres demandados correctamente a partir de 6 bares de presión. Para presiones inferiores a 6 bar, las electroválvulas funcionan correctamente.

Estas propuestas y estudios permitirán que los fabricantes suministren una información más detallada de sus productos, mejorando así su competitividad en el mercado. De esta misma manera se benefician los usuarios de los sistemas de telecontrol, que ven asegurada la calidad y compatibilidad de los elementos que se instalan en campo. Las pruebas indicadas en el banco servirán de inicio y de forma experimental, para establecer un protocolo de ensayo de electroválvulas que podría incluirse como parte de la norma de telecontrol que se está desarrollando o como parte de una norma específica de electroválvulas para riego.

El nuevo banco de electroválvulas, integra las pruebas necesarias a realizar a todos los modelos diferentes y tipos de electroválvulas existentes en el mercado. Gracias al nuevo banco, se podrá comparar el funcionamiento entre distintos modelos para poder ver hasta qué punto afectan a su correcto funcionamiento las condiciones ambientales, calidad y temperatura del agua y su durabilidad en el tiempo.

Es recomendable, como se ha podido comprobar tras los ensayos realizados que, previo a la instalación en obra de los equipos pasen una serie de pruebas en laboratorios para poder asegurar que cumple con unos requisitos mínimos y que tienen un funcionamiento correcto. Es recomendable, por ejemplo, realizar las pruebas de los equipos tanto de manera individualizada como en conjunto. Se recomienda realizar ensayos a electroválvulas y a válvulas hidráulicas por separado, pero se considera casi igual de importante realizar los ensayos en conjunto para no encontrar incompatibilidades entre ellos.

## PRODUCTIVIDAD EN CULTIVOS DE ALTO IMPACTO SOCIAL EN AGRICULTURA PROTEGIDA AL NORESTE DE LA REPÚBLICA MEXICANA IMPLEMENTANDO DIVERSAS TECNOLOGÍAS DE RIEGO

*Bautista Capetillo Carlos F<sup>1</sup>, Mojarro Dávila Francisco<sup>2</sup>, Márquez Villagrana Héctor H<sup>3</sup>, Robles Rovelo Octavio<sup>4</sup>, Medina Carreón Aarón<sup>5</sup>, Félix Félix Jesús R.<sup>6</sup>*

<sup>1,2</sup> Docente-Investigador, Universidad Autónoma de Zacatecas Av. Ramón López Velarde 801 Col. Centro, Cp. 98000, Zacatecas, Zacatecas, México. Tel.: (+52) 492 92 56690 Ext. 4254. <sup>1</sup>E-mail: [baucap@uaz.edu.mx](mailto:baucap@uaz.edu.mx), <sup>2</sup>E-mail: [mojarro\\_fr@yahoo.com.mx](mailto:mojarro_fr@yahoo.com.mx)  
<sup>3, 4, 5, 6</sup> Maestro en Planeación de Recursos Hidráulicos, Universidad Autónoma de Zacatecas Av. Ramón López Velarde 801 Col. Centro, Cp. 98000, Zacatecas, Zacatecas, México. Tel.: (+52) 492 92 56690 Ext. 4254. <sup>3</sup>E-mail: [hugomarquezv@hotmail.com](mailto:hugomarquezv@hotmail.com), <sup>4</sup>E-mail: [corr03@hotmail.com](mailto:corr03@hotmail.com), <sup>5</sup>E-mail: [ing.aaron.medina@gmail.com](mailto:ing.aaron.medina@gmail.com), <sup>6</sup>E-mail: [ramiro\\_felix\\_89@hotmail.com](mailto:ramiro_felix_89@hotmail.com).

### Resumen

Actualmente en México existen 85 distritos de riego que cubren 3'498,164 ha del territorio nacional, durante los últimos 20 años la sequía ha originado que en 8 de ellos no se tenga agua para riego. El Distrito de Riego 025 Bajo Río Bravo se localiza en el estado de Tamaulipas con una superficie física de riego de 192,438 ha. En este distrito se practica en un 96% el riego por gravedad mientras que en el resto se lleva a cabo el riego presurizado en sus diversas modalidades. Para un periodo de 11 años de registro se tiene una productividad bruta promedio de 1.16 kg/m<sup>3</sup> de agua para los cultivos de maíz y sorgo.

El presente trabajo se realizó en una superficie de riego que consistió de tres naves protegidas con casa-malla, cada una con una superficie de 1.3 ha, Los cultivos seleccionados para la producción piloto fueron: tomate en tres de sus variedades, pepino, chile habanero y pimiento morrón, con una superficie física de 6 712 m<sup>2</sup>, 6 712 m<sup>2</sup>, 6 712 m<sup>2</sup>, 20 136 m<sup>2</sup>, respectivamente. Se realizaron diversos trabajos para habilitar cada nave como: la preparación de tierras, formación de camas, instalación y reparación del sistema de riego, acolchado plástico sobre las camas de siembra, instalación de medidores de flujo y de presión. Se llevó a cabo el monitoreo del clima con el uso de 4 estaciones climatológicas una a cielo abierto y tres dentro de las naves; como un factor más para la aplicación del riego, se monitoreó la humedad del suelo a profundidades de 30 y 60 cm utilizando 24 sensores puntuales distribuidos equitativamente en todas las naves.

Se obtuvieron rendimientos en los cultivos de: 34.61 ton/ha para el pepino, 40.9 ton/ha para el jitomate, 9.19 ton/ha para pimiento morrón y 1.05 ton/ha para el chile habanero.

### 1- Introducción

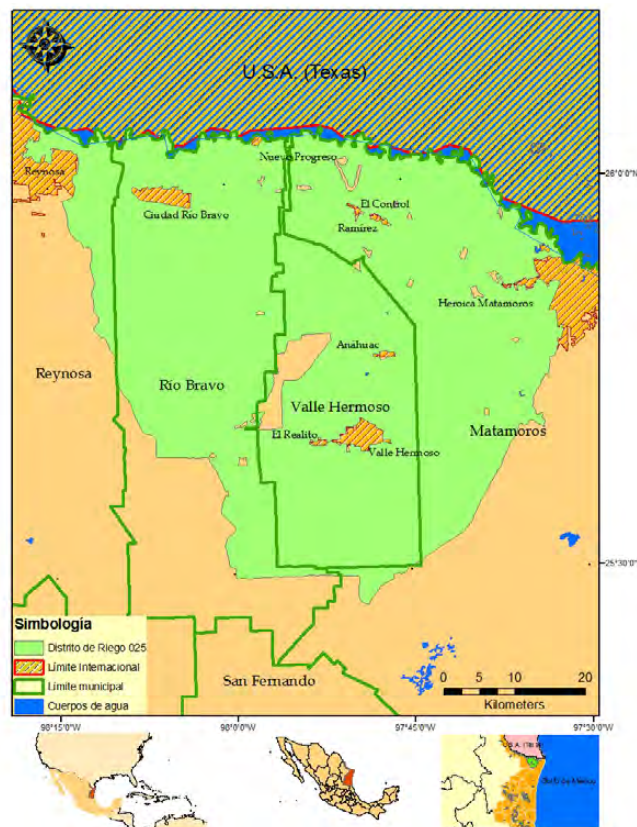
El uso consuntivo de agua predominante en México es el del sector agrícola, con alrededor del 52.9 por ciento del total de agua extraída de la superficie y 24.1 por ciento subterránea, mientras que el consumo de población e industrial requieren el 14 y 9 por ciento, respectivamente (CONAGUA, 2010).

Los distritos de riego localizados en toda la extensión de México son divisiones de superficies para la gestión del agua mediante obras como presas, derivaciones, plantas de bombeo, pozos, canales, etc. Actualmente en México existen 85 distritos de riego que cubren 3'498,164 ha del territorio nacional, durante los últimos 20 años la sequía ha



originado que en 8 de ellos no se tenga disponibilidad de agua para riego. En cuanto a la aplicación del agua por los actuales sistemas parcelarios, se puede decir que la eficiencia de conducción y distribución promedio en distritos y unidades de riego es del 81 por ciento y la de aplicación es del 60 por ciento, esto se traduce en una eficiencia total de 48 por ciento, así por ejemplo, del total del agua disponible en el año 2000, 72 km<sup>3</sup> de agua se emplearon para el riego de 5.7 millones de ha; sin embargo, sólo 34 km<sup>3</sup> fueron utilizados de manera efectiva para obtener las cosechas de los cultivos (CONAGUA, 2013; CONAGUA, 2014).

El Distrito de Riego 025 (DR025) conocido como Bajo Río Bravo se localiza al noreste del estado de Tamaulipas, entre los municipios de Valle Hermoso, Matamoros, Río Bravo y Reynosa, se ubica entre las coordenadas geográficas 26° 03' - 25° 27' de Latitud Norte, 98° 15' - 97° 32' de Longitud Oeste y a una altura media respecto al nivel del mar que va de los 5 m a los 35 m. Tiene una superficie total de 269 mil ha de riego, conformado por nueve módulos de riego, los cuales forman una sociedad de responsabilidad limitada que administra la red mayor de distribución (Figura 1). El DR025 fue creado por acuerdo presidencial el 3 de junio del año 1942 (CONAGUA, 2008).



**Figura 1.** Localización geográfica del DR025 Bajo Río Bravo.

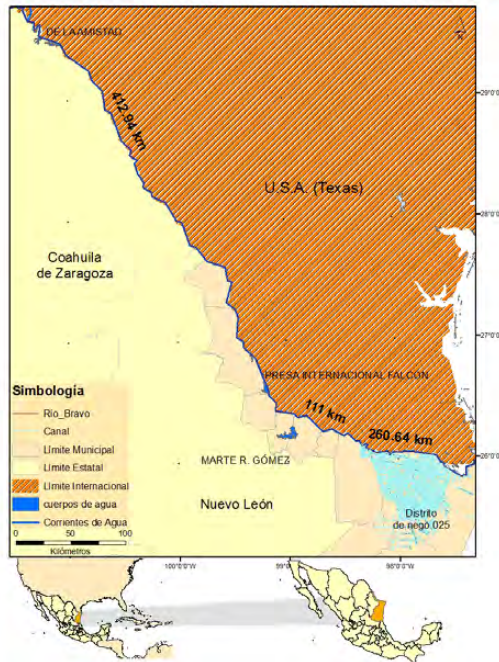
La superficie física y de riego del distrito 025 es de 248,391.70 ha y 201,237.34 ha respectivamente; sin embargo, para el periodo 2012-2013 la superficie física de riego registrada fue de 192,438 ha. Históricamente los principales cultivos del distrito 025 son el maíz y el sorgo (CONAGUA, 2014).

Concretamente, en el Distrito de Riego 025 Bajo Río Bravo, Tamaulipas, la asignación de agua ha sido tan baja durante los últimos años, que en algunos ciclos agrícolas no se ha garantizado el riego de los cultivos. Otras ocasiones, se ha restringido la superficie a regar, por lo que el área a sembrar en el DR025 depende básicamente de la disponibilidad de agua existente en el sistema de presas internacionales.

Los almacenamientos superficiales que abastecen de agua al distrito de riego 025 son la Presa La Amistad y Presa Falcón (Figura 2). La Presa Internacional La Amistad se



localiza en el estado de Coahuila de Zaragoza, la distancia sobre el Río Bravo hasta la Presa Internacional Falcón es de 413 km aproximadamente. De ahí hasta el inicio del Distrito de riego 025 Bajo Río Bravo existen una longitud de 111 km (CONAGUA, 2006).



**Figura 2.** Almacenamientos superficiales en el DR025.

La temperatura media anual registrada en las estaciones ubicadas dentro del distrito es de 23.4°C, siendo los meses más calurosos de junio a agosto. La temperatura promedio máxima mensual es de 34.6 °C en el mes de agosto y la promedio mínima mensual de 10.5°C en el mes de diciembre. En cuanto a la precipitación, se tiene una media anual de 696.7 mm, siendo los meses más lluviosos septiembre y octubre con un porcentaje del 36.6% del total de la lluvia. Por otra parte, la evaporación media anual en el distrito es de 1,748.9 mm, muy por encima de la precipitación (251%), los meses de mayor evaporación de junio a agosto. La velocidad del viento, presenta un promedio anual de 9.2 km/hr, las de mayor intensidad se presentan en verano e invierno. En esta última época, se asocian de masas frías continentales que son conocidas como “nortes”, presentándose bajas temperaturas que ocasionan daños a los cultivos establecidos en estas fechas, por lo que deben implementarse medidas que mitiguen pérdidas de producción, como acolchado con plástico, aplicación de materia orgánica en las camas de siembra, protección de cultivos (casa malla, invernadero, micro túneles, entre otras), sistemas de calefacción (eléctricos o de gas), por mencionar algunos.

En este distrito se practica en un 96% el riego por gravedad mientras que en el resto se lleva a cabo el riego presurizado en sus diversas modalidades. Actualmente se cultivan tomate, frijol, pastos, maíz y sorgo, siendo estos dos últimos los de mayor producción en la región (CONAGUA, 2008).

Es evidente que la tecnificación parcelaria del riego a de sistemas de riego por goteo presenta diversas ventajas: aumenta la eficiencia de riego, aumenta la producción y productividad del agua en condiciones de cielo abierto y de agricultura protegida, además de presentar altas eficiencias de aplicación de entre 85 y 95%; los intervalos de riego son cortos (algunos días u horas), disminución de pérdidas por evaporación, percolación y escurrimiento superficial, incrementa la producción y la calidad de las cosechas con adecuados cuidados.

Diversos trabajos de investigación han sido evaluados implementando el riego por goteo con hortalizas a cielo abierto o casa malla (Harmanto, et al, 2005; Orgaz, F., et al, 2005; Bonachela, S. et al, 2006; Fernández, M. D., et al, 2007; Zotarelli, et al, 2007; Nagaz, K., et al, 2012; Ole M. P., 2012; Quintanal, et al, 2012; Yaghi, T., et al, 2013; Azeem, M.T, y Tariq, M., 2014; Soto, F., et al, 2014), las variables que se han estudiado varían entre la frecuencia de aplicación de agua, dosis de fertilizantes, diversidad de cultivos, la dosis de agua al considerar cierto porcentaje de ETo (Evapotranspiración de referencia) y por último, el acolchado del suelo, además constituye una alternativa ecológicamente sustentable, técnicamente factible y económicamente viable.

Una de las principales acciones para mejorar el funcionamiento del riego por goteo se basa en su automatización a diferentes niveles, ya que con este sistema se ahorra mano de obra, agua y energía eléctrica (Marcillo et al., 2011), por otro lado, Cadahia (1998) señala que el interés en la automatización de los sistemas de riego por goteo ha resultado en un aumento en la investigación y desarrollo en el campo de la instrumentación y equipo de cómputos sofisticados. Actualmente una gran variedad de instrumentación y equipo de cómputos para la automatización del riego están disponibles comercialmente.

Terán et al. (2007) trabajaron en Colombia con el cultivo de jitomate en invernadero, la producción media en este país es de 42.9 ton/ha, mencionan además que la conductividad eléctrica del agua debe estar entre 1.5 y 2.0 dS/m, la humedad relativa óptima oscila entre 60 y 80%, mientras que las humedades relativas altas favorecen el desarrollo de enfermedades de las plantas y causan agrietamiento del fruto, también que el valor óptimo para elevar los rendimientos del tomate es 1.4 de la evaporación del Tanque Tipo "A", con una lámina de 825 mm/ciclo, equivalente a 8,250 m<sup>3</sup>/ha.

Por otro lado Rodríguez et al. (2011), trabajaron en el Valle Yaqui de México con chile banana y suelo cubierto con acolchado plástico con Agribon, aplicaron láminas de 327 mm/ha para un corte de 120 días, demuestran que en el cultivo protegido se presenta una disminución del 57 % en la evapotranspiración del cultivo.

En el estado de Tabasco, México, López et al. (2010), encontraron que en el cultivo de tomate cascara con acolchado plástico y aplicación del 60% de la ETo expresada en lámina mantiene valores de potencial mátrico cercanos a capacidad de campo, por lo que sería suficiente el riego basado en este porcentaje para cumplir con el requerimiento hídrico del cultivo.

Debido a lo anterior, el objetivo de esta investigación radica en el desarrollo de un paquete tecnológico para la demostración de la producción piloto considerando cultivos de alto margen de exportación como pepino, tomate, pimiento morrón y chile habanero en la región centro norte del Distrito de Riego 025, en el estado de Tamaulipas, México.

## 2- Materiales y métodos

La parcela experimental donde se llevó a cabo la investigación se ubica en el predio denominado Rancho La Gloria, localizado entre las coordenadas geográficas 25° 59' 54'' de Latitud Norte, 97° 57' 40'' de Longitud Oeste y a una altura media respecto al nivel del mar de 20 m, en el municipio de Ciudad Río Bravo, Tamaulipas, México (Figura 3).

La superficie de riego se llevó a cabo en tres naves experimentales cada una con una superficie de 1.3 ha, mismas que fueron resguardadas en una estructura metálica protegida con malla sombra; así mismo, los cultivos seleccionados para la producción piloto fueron: jitomate, pepino, chile habanero y pimiento morrón, con una superficie neta de 3,356 m<sup>2</sup>, 3,356 m<sup>2</sup>, 3,476 m<sup>2</sup>, 10,196 m<sup>2</sup>, respectivamente (Figura 4).

Para el monitoreo del clima en tiempo real se instalaron 3 estaciones climatológicas de la casa Davis Instrument al centro de cada una de las naves, las cajas receptoras de datos (datalogger) del conjunto de estaciones se encuentran en las naves 6 y 7. Para el monitoreo de la humedad en el suelo se instalaron 8 sensores de humedad de la casa Watch Dog en cada una de las naves (cuatro a una profundidad de 30 cm y cuatro a una

profundidad de 60 cm), tanto las estaciones climatológicas como los sensores de humedad cuentan con un software para la revisión de la información y para descarga de datos a un ordenador portátil. Se instalaron 8 manómetros de glicerina dos en cada inicio de la línea de distribución de cada nave (medición de presión de entrada), así mismo, se instalaron 6 manómetros, dos dentro de cada nave en las últimas regantes (medición de presión de salida), seis medidores de caudal fueron instalados (dos por cada nave).

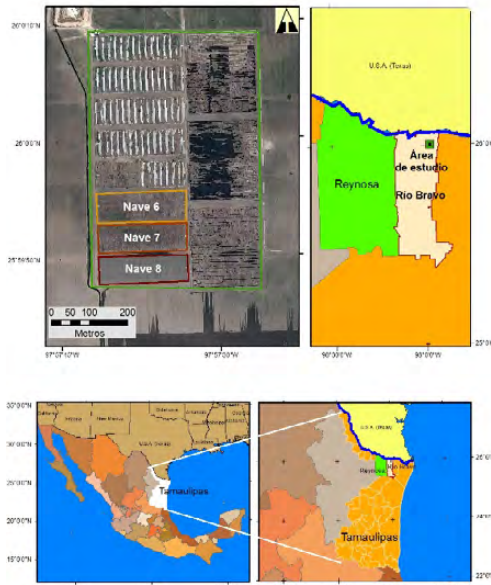


Figura 3. Localización del área de estudio.



Figura 4. Esquema de la instalación del equipo y distribución de los cultivos.

**Características del diseño del sistema de riego por goteo.** El espaciamiento entre líneas regantes se estableció en 1.6 metros de acuerdo a especificaciones de cada cultivo a sembrar, cada uno de los 28 túneles de las naves cuenta con 5 camas para la siembra de los cultivos, el ancho de cada cama es de aproximadamente 0.8 m. La cintilla instalada fue calibre 6000, con goteros espaciados a cada 20 cm, el caudal de 3.74 lph por metro lineal de cintilla, con presión de operación de 0.56 bares (8 psi), se tendieron 283 líneas de cintilla por nave cada una con una longitud de 30 m. Este tipo de cintilla se eligió debido las características del suelo (velocidad de infiltración básica de 2 a 8 mm hr<sup>-1</sup> según Montiel, 2012). El caudal de extracción en el pozo es aproximadamente de 15 a 17 litros por segundo, suficientes para irrigar simultáneamente 2.01 hectáreas. Cabe mencionar que las líneas de conducción y distribución se encontraban instaladas, únicamente se habilitaron las líneas regantes y el sistema de bombeo.

Diversas variables se estimaron para la evaluación del riego: calidad de agua, características físico químicas del suelo, evapotranspiración de los cultivos, monitoreo de la humedad en el suelo, crecimiento de planta y condiciones climatológicas de la región.

### 3- Resultados y discusión

Los trabajos realizados en esta investigación iniciaron con el reconocimiento en campo para revisar el estado del sistema de riego y proponer soluciones para la operación, así mismo se realizó un levantamiento topográfico (Estación total marca Sokkia) para la definición de la nivelación del terreno y planeación de instalación de infraestructura de riego.

El agua se definió en calidad apta para riego con un tratamiento primario, presentó una conductividad eléctrica de 2.98 µS/cm, pH de 7.48, oxígeno disuelto de 7.02 mg/lt, la temperatura del agua utilizada fue de aproximadamente 22°C y los sólidos disueltos de 1555 mg/lt.

Para la caracterización físico-química del suelo se tomaron 18 muestras de suelo, 9 a una profundidad de 30cm y 9 a una profundidad de 60cm, el muestreo se llevó a cabo de acuerdo a la norma oficial mexicana NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2000). El suelo resulto en su mayoría en uno franco arcilloso con una saturación de 53%, capacidad de campo (Cc) de 39.9%, punto de marchitez permanente (Pmp) de 21.9% y densidad aparente de 1.3, valores promedio para toda la superficie de riego.

**Tabla 1.** Características físico-químicas del suelo en cada una de las naves experimentales.

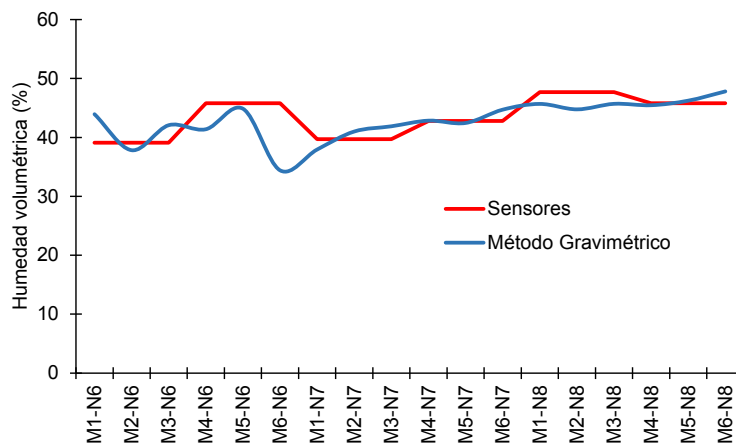
Nave	Estrato (cm)	Arena (%)	Arcilla (%)	Limo (%)	Clase textural	Punto a saturación (%)	Cc (%)	Pmp (%)	Densidad aparente (gr/cm <sup>3</sup> )
6	0-30	42.60	32.68	24.72	Franco-arcilloso	51.25	38.43	21.14	1.33
	30-60	47.32	32.68	20.00	Franco-arcilloso	53.03	39.77	21.87	1.37
7	0-30	42.60	32.68	24.72	Franco-arcilloso	51.25	38.43	21.14	1.33
	30-60	47.32	32.68	20.00	Franco-arcilloso	53.03	39.77	21.87	1.37
8	0-30	32.96	32.68	28.36	Arcilla	63.73	47.79	26.29	1.31
	30-60	31.32	47.04	21.64	Arcilla	44.91	33.68	18.52	1.32

Con base en lo anterior, se obtuvieron los caudales necesarios (Tabla 2) para la operación del sistema en conjunto, y así, determinar el tiempo de riego.

**Tabla 2.** Caudales para cada cultivo.

Cultivo	Sup. de riego (m <sup>2</sup> )	Sup. efectiva de riego (m <sup>2</sup> )	No. de camas	Longitud de las camas (m)	No. de goteros por cama	Espacio entre emisores (m)	Volumen de descarga (m <sup>3</sup> )	Caudal (lps)
Pimiento morrón rojo	6444	3222	134	30	150	0.2	15.03	4.18
Pimiento morrón amarillo	5235	2618	109	30	150	0.2	12.23	3.40
Pimiento morrón naranja	5235	2618	109	30	150	0.2	12.23	3.40
Pimiento morrón verde	3222	1611	67	30	150	0.2	7.52	2.09
Pepino	6712	3356	140	30	150	0.2	15.71	4.36
Chile habanero	6712	3356	140	30	150	0.2	15.71	4.36
Tomate	6712	3356	140	30	150	0.2	15.71	4.36

Se tomaron 6 muestras de suelo en cada una de las naves experimentales a una profundidad de 30 cm, con el objetivo de comparar el monitoreo de la humedad del suelo de los sensores y la humedad obtenida por el método gravimétrico (Figura 5).



M=Muestra de suelo; N=Nave

**Figura 5.** Humedad volumétrica en el suelo obtenida por el método gravimétrico y por sensores de humedad.

Los datos de la Figura 5 indican mínimas diferencias en cuanto al contenido de humedad registrado en los sensores y el obtenido con el método gravimétrico (nave 6-1.7%, nave 7-0.6%, nave 8-0.8%) con lo que se verifica la funcionalidad y confiabilidad de las lecturas de los sensores de humedad.

El 18 de agosto de 2014 comenzó el trasplante de jitomate y pepino (nave 6), posteriormente el 20 de agosto de ese mismo se trasplantó el pimiento morrón y chile habanero (naves 7 y 8). Con una densidad de plantas de 40,000 por hectárea para el pimiento morrón y chile habanero, y de 20,000 por hectárea para el pepino y jitomate. Por otro lado, la cosecha inició en el mes de octubre del año 2014 para el pepino, para el jitomate y pimiento morrón en noviembre-diciembre del año 2014, y el chile habanero en marzo del 2015.



La producción, productividad y lámina de riego para cada cultivo fue: a) pepino: producción de 34.67 ton/ha, productividad de 22.36 kg/m<sup>3</sup>, lámina de 230 mm; b) pimiento morrón: producción de 9.19 ton/ha, productividad fue 3.32 kg/m<sup>3</sup>, lámina de 277 mm; c) chile habanero: producción de 1.05 ton/ha, 0.3 kg/m<sup>3</sup> de productividad, lámina de 350 mm; d) tomate: producción de 40.90 ton/ha, 11.24 kg/m<sup>3</sup> de productividad, lámina de 364 mm. De acuerdo al Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2014) y a las Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego-EADR- (2014), en el estado de Tamaulipas la producción media en el ciclo Otoño-Invierno para el pepino fue de 15.5 ton/ha, para el pimiento de 36.0 ton/ha, para el chile habanero de 10.0 ton/ha y para el tomate de 21.43 ton/ha. Cabe mencionar que a la fecha (abril de 2015) el pimiento morrón y chile habanero se encuentra periodo de cosecha y se tiene una expectativa de obtener una producción por encima de la reportada por el SIAP y EADR, 2014, los datos anteriores, muestran un incremento en el rendimiento del 192% para el pepino y para el jitomate del 191 %.

Diversos problemas se presentaron que complicaron el proceso de una alta producción entre los cuales se encuentran los excesos de humedad por las altas precipitaciones en el mes de septiembre (180.4 mm, esta precipitación fue un 63 % superior a la media histórica correspondiente a ese mes), así como plagas y enfermedades que ocasionaron daños de alguna manera a los cultivos establecidos, lo que origino pérdidas menores en todos los cultivos.

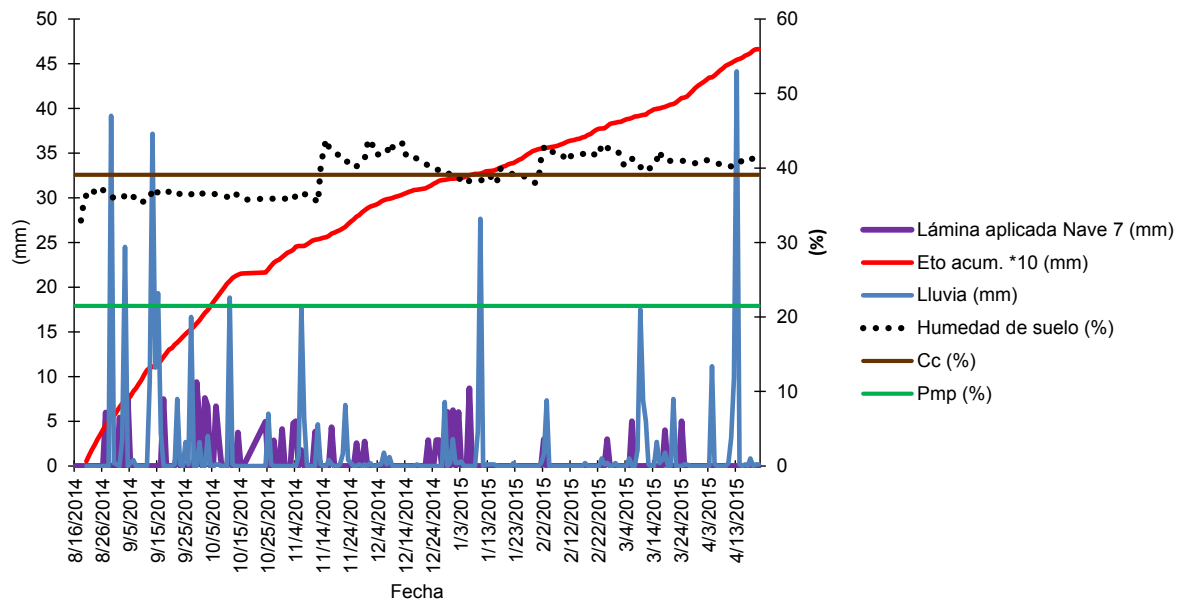
A principios del mes de octubre 2014, en general, la humedad del suelo se encontró por debajo de capacidad de campo por lo que son notables los riegos hasta la presencia de lluvias. Diversos investigadores han determinado que a la presencia de protección del suelo con acolchado plástico la evapotranspiración del cultivo disminuye en un rango de 30% a 40% de su valor en condiciones normales (López et al., 2010; Rodríguez et al., 2011), por lo que el criterio para la definición del riego a los cultivos en las diferentes naves hasta el mes de noviembre 2014 fue considerar el 60% de la evapotranspiración del cultivo según se requirió. A partir de este mes, los riegos fueron sólo para fertilización debido a las intensidades de lluvia (registros máximos de hasta 50 mm en menos de 24 hrs en el mes de febrero 2015), por lo que la aplicación de agua se definió en base a las lecturas de los sensores de humedad (a una profundidad de 30 cm), considerando un 65% de la humedad fácilmente aprovechable según Montiel, 2012 (Tabla 3).

**Tabla 3.** Criterio para la aplicación de riego en base al contenido volumétrico de humedad (%) registrado en los sensores.

Nave	Tipo de suelo	Cc (%)	Pmp (%)	Rango de humedad considerado (%)	Aplicar riego (%)
Nave 6	Franco Arcilloso	38.44	21.14	32-38	< 32
Nave 7	Franco Arcilloso	38.43	21.15	32-38	< 32
Nave 8	Arcilloso	47.79	26.29	40-48	< 40

En promedio, para todas las naves, las estaciones climatológicas registraron una evapotranspiración potencial de 1.95 mm/día, precipitación de 523.9 mm, humedad relativa de 81.8 %, temperatura media de 22.02 °C y velocidad del viento de 3.52 km/hr. Estos resultados fueron evaluados desde el mes agosto del año 2014 hasta abril del año 2015. En la Figura 6 se ilustran los datos registrados por la estación climatológica de la nave 7.





**Figura 6.** Registros históricos de la estación climatológica y sensor de humedad de la Nave 7 con cultivo de pimiento morrón y chile habanero (lamina aplicada, precipitación, evapotranspiración, contenido de humedad del suelo, capacidad de campo-Cc-, punto de marchitez permanente –Pmp-, evapotranspiración acumulada -\*10 mm-).

Para evaluar el riego en las parcela experimentales se determinaron parámetros como la uniformidad de distribución (U.D.) (Christiansen, 1942) y la eficiencia de aplicación en cada una de las naves (Tabla 4).

**Tabla 4.** Indicadores del rendimiento durante el riego.

<b>Nave</b>	<b>C.U.</b>	<b>U.D.</b>	<b>Eficiencia de aplicación (%)</b>
6	0.92	89.0	91.0
7	0.96	95.9	94.0
8	0.94	89.5	92.0

Los resultados de la Tabla 4 clasifican al sistema en conjunto, y de acuerdo al autor, como bueno en lo que concierne uniformidad (C.U.) y aplicación de agua.

#### 4- Conclusiones y recomendaciones

Los rendimientos de los cultivos y productividad del agua de la zona experimental se elevaron para el pepino y para jitomate, el pimiento morrón y chile habanero se encuentran aún en etapa de cosecha por lo no se ha llegado a los resultados finales de producción y rendimientos. Se ha demostrado que esta metodología puede implementada en la región rompiendo el esquema comúnmente practicado en la zona, y un proyecto prácticamente viable a corto o mediano plazo para los usuarios de la región y con una prospectiva estratégica, puede ser sostenible, es decir, económicamente rentable. Para el caso específico de este distrito de riego, el mercado es amplio pues no solamente podría abastecer en pequeña proporción la demanda regional y/o nacional sino también, y debido a la cercanía con Estados Unidos de Norteamérica, ampliar el comercio con este país vecino, cumpliendo ampliamente con los requerimientos de calidad que esto conlleve.

## 5- Bibliografía

- Azeem, M.T. y Tariq, M. (2014). Evaluation of comparative water use efficiency of furrow and drip irrigation systems for off-season vegetables under plastic tunnel. *International journal of agriculture and crop sciences*. 4. 185-190.
- Bonachela, S. González, A.M. y Fernández, M.D. (2006). Irrigation scheduling of plastic greenhouse vegetable crops based on historical weather data. *Irrigation Science*. 1. 53-62.
- Cadahia, L.C. (1998). *Fertirrigación. Cultivos hortícolas y ornamentales*. Ediciones Mundi-Prensa. España.
- Christiansen, J.E. (1942). *Irrigation by Sprinkling*. California Agricultural Experiment Station Bull, 670.
- CONAGUA (2006). Plan director para la modernización integral del riego del Distrito de riego 025 bajo Río Bravo, Tamaulipas. Universidad Autónoma de Chapingo. Departamento de Irrigación. Chapingo, México.
- CONAGUA (2008). Manual de operación del programa de rehabilitación, modernización, tecnificación y equipamiento de distritos de riego y temporal tecnificado, componente de equipamiento de los distritos de riego. Subdirección general de infraestructura hidroagrícola. Gerencia de Distrito de Riego.
- CONAGUA (2010). Estadísticas del agua en México.
- CONAGUA (2013). Estadísticas agrícolas de los distritos de riego.
- CONAGUA (2014). Plan nacional hidráulico 2013-2018.
- EADR (2014). Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego. IMTA-CONAGUA.
- Fernández, M. D. González, A.M. Carreño, J. Pérez, C. y Bonachela, S. (2007). Analysis of on-farm irrigation performance in Mediterranean greenhouses. *Agricultural Water Management*. 1. 251-260.
- Harmanto, Salokhe, V.M. Babel, M.S. y Tantau, H.J. (2005). Water requirement of drip irrigated tomatoes grown in greenhouse in tropical environment. *Agricultural Water Management*. 1. 225-242.
- López, L.R. Arteaga, R.R. Vázquez, P.M. López, C.I. y Sánchez, C.I. (2010). Producción de tomate de cascara (*physalis ixocarpa* Brot.) basado en láminas de riego y acolchado plástico. *Revista Chapingo serie horticultura*. 1. 83-89.
- Marcillo, Z.H. Ortega, C.J. Quijano, V.H. y Sornoza, M.J. (2011). Automatización de un sistema de riego por goteo en invernadero para la producción del cultivo de tomate (*lycopersicum esculentum* mill.) en la hacienda "La Teodomira". Tesis de grado. Ecuador.
- Montiel, V.A. (2012). Diseño agronómico de sistemas de riego presurizado. Universidad Autónoma de Chapingo. México.
- Nagaz, K. Moncef, M.M. y Mechlia, N.B. (2012). Effects of deficit drip-irrigation scheduling regimes with saline water on pepper yield, water productivity and soil salinity under arid conditions of Tunisia. *Journal of Agriculture and Environment for International Development*. 2. 85-103.
- Ole, M.P. (2012). Comparison of water consumption between greenhouse and outdoor cultivation. Thesis of Master Science. Irrigation and Drainage. Enschede, the Netherlands.
- Orgaz, F. Fernández, M.D. Bonachela, S. Gallardo, M. y Fereres, M. (2005). Evapotranspiration of horticultural crops in an unheated plastic greenhouse. *Agricultural Water Management*. 1. 81-96.
- Quintanal, O.W. Pérez, G.A. Latournerie, M.L. May, L.C. Ruiz, S.E. y Martínez, Ch. A. (2012). Uso de agua, potencial hídrico y rendimiento de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.). División de Estudios de Posgrado e Investigación. Instituto Tecnológico de Conkal. Mérida, Yucatán, México.



- Rodríguez, J.C. Watts, C. Garatuzza, P.J. Rivera, M.A. Lizarraga, C.C. López, E.J. Ochoa, M.A. Moreno, S.S. y Rentería, M.M. (2011). Evapotranspiración y coeficiente de cultivo en Chile banana (*capsicum annum* L.) en el valle del Yaqui, México. *Revista de ciencias biológicas y de salud*. 3. 28-35.
- SEMARNAT (2000). Norma Oficial Mexicana, (NOM-021-SEMARNAT-2000). Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis.
- SIAP (2014). Servicio de información agroalimentaria y pesquera para el estado de Tamaulipas, México.
- Soto, F. Gallardo, M. Giménez, C. Peña, F.T y Thompson, R.B. (2014). Simulation of tomato growth, water and N dynamics using the EU Rotate\_N model in Mediterranean greenhouses with drip irrigation and ferti-irrigation. *Agricultural Water Management*. 1. 46-59.
- Terán, Ch. C. Valenzuela, M.M. Villaneda, V.E. Sánchez, L.G. e Hio, P.J. (2007). Manejo del riego y la fertirrigación en tomate bajo cubierta en la sabana de Bogotá. *Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria*. 1. 88.
- Yaghi, T. Arslan, A. y Naoum, F. (2013). Cucumber (*Cucumis sativus*, L.) water use efficiency (WUE) under plastic mulch and drip irrigation. *Agricultural Water Management*. 1. 149-157.
- Zotarelli, L. Dukes, M.D. Scholberg, J.M. Hanselman, T. Femminella, L.K. y Muñoz, C.R. (2007). Nitrogen and water use efficiency of zucchini squash for a plastic mulch bed system on a sandy soil. 1. 8-16.



# EVALUACIÓN Y PROPUESTAS DE MEJORA DEL USO DE LA ENERGÍA EN REDES DE RIEGO. APLICACIÓN A LA COMUNIDAD DE REGANTES MURADA NORTE (ORIHUELA, ALICANTE)

*Ruiz-Rodríguez, M. (1) (P), Jiménez-Bello, M.A. (2), Pulido-Velázquez, M. (3)*

<sup>1</sup> Candidato a Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, ETSI Caminos, Canales y Puertos, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain, [marruir2@gmail.com](mailto:marruir2@gmail.com)

<sup>2</sup> Profesor, Instituto universitario de investigación de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA), Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain, [mijibar@dihma.upv.es](mailto:mijibar@dihma.upv.es)

<sup>3</sup> Profesor, Instituto universitario de investigación de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA), Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain, [mapuve@upv.es](mailto:mapuve@upv.es)

## Resumen

La modernización de las infraestructuras agrícolas de regadío ha supuesto generalmente un incremento en el consumo energético de estas instalaciones. Tomando como referencia el Protocolo de Auditoría Energética en Comunidad de Regantes (CCRR) del Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE), se evalúan e identifican actuaciones de mejora del uso de la energía en la red de riego de la CCRR Murada Norte (Orihuela, Alicante). En primer lugar se caracteriza la red de riego, su gestión y su consumo, elaborando un modelo matemático de la red con herramientas SIG y EPANET. Posteriormente se realiza una evaluación del uso de la energía con los indicadores de gestión energética del protocolo del IDAE, a través del cual se consigue calificar energéticamente la CCRR. Finalmente como actuaciones de mejora se propone la construcción de una nueva balsa de regulación que permite reducir la altura media de impulsión, la sustitución del equipo de bombeo actual para mejorar la eficiencia del bombeo y reducir la potencia contratada en horas punta, y la renegociación de la tarifa eléctrica.

## 1- Introducción

En España la agricultura de regadío produce casi el 60% de la producción agrícola nacional, que representa alrededor del 8% del PIB nacional, utilizando únicamente el 14% de la superficie agraria útil (Del Campo, 2014). Esto justifica la gran importancia económica del regadío dentro el sector de la agricultura en nuestro país. El regadío es el uso consuntivo que más agua demanda, tanto en España como a nivel mundial (70%) (WWAP, 2014). Por esta razón, durante los últimos años se viene produciendo una modernización de las técnicas de riego en este sector de acuerdo con el Plan Nacional de Regadíos, con el objetivo de realizar un uso más eficiente del recurso hídrico y cuya inversión ha supuesto unos 6.000 millones de euros (Del Campo, 2014).

Los resultados se reflejan en datos del INE, donde se observa que la demanda de años atrás de 24.250 Hm<sup>3</sup> anuales, representando un 80% de los usos consuntivos, ha pasado a partir del proceso de modernización al entorno de los 16.000 Hm<sup>3</sup>, representando

un 63% de los usos consuntivos. Esta evolución ha sido posible gracias a la mayor utilización de técnicas de riego más eficientes con el uso del agua, destacando el riego localizado, comúnmente conocido como riego por goteo. Actualmente, España es el segundo país del mundo en porcentaje de uso de riego localizado, y el primero en número de hectáreas regadas por este método (Del Campo, 2014). Esta tendencia a un mayor uso del riego localizado ha supuesto un aumento del consumo energético en las instalaciones de regadío, ya que estas técnicas requieren de una mayor aportación de energía a la red en forma de presión. *“La mayor eficiencia hídrica va ligada a una mayor ineficiencia energética”* (Corominas, 2010). En 2010 la agricultura de regadío era responsable del 2,5% del consumo energético total del país (Hardy y Garrido, 2010). En consecuencia, el coste en término de potencia de la factura eléctrica en las Comunidades de Regantes (CCRR), coste fijo independiente del consumo, ha aumentado entre el 1000% y el 1200% entre los años 2008 y 2013, siendo el incremento total de la factura eléctrica en este período de aproximadamente el 100% (Del Campo, 2014). En relación con estos aspectos, y buscando reducir las emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI) de acuerdo con el Protocolo de Kioto, el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) con la colaboración del MAGRAMA elaboraron en 2008 una serie de documentos técnicos en materia de eficiencia energética en Comunidades de Regantes: *“Ahorro y Eficiencia Energética en las Comunidades de Regantes”* y *“Protocolo de Auditoría Energética en Comunidades de Regantes”*.

En este trabajo, tomando como referencia ambos documentos del IDAE, se evalúan e identifican actuaciones de mejora del uso de la energía en la red de riego de la CCRR Murada Norte, situada en el término municipal de Orihuela (Alicante).

## 2- Materiales y métodos

El procedimiento llevado a cabo para identificar y analizar actuaciones que permitan un mejor uso energético de la red de riego se compone de tres fases: Caracterización de la red, Evaluación del uso de la energía y Análisis de las propuestas de mejora.

### 2.1 Caracterización de la red

En la fase de caracterización de la red, se recopila información relativa a los consumos de agua y energía y su distribución temporal durante el período analizado, los elementos que componen la red, y el modelo de gestión y explotación de la instalación. Con esta información, y haciendo uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y el programa de simulación de redes presurizadas EPANET, se elabora un modelo matemático de la red que permite analizar su comportamiento hidráulico y simular escenarios distintos al actual (Jiménez, 2008).

### 2.2 Evaluación del uso de la energía

En la fase de evaluación del uso de la energía, se utilizan indicadores de gestión energética que permiten cuantificar y calificar el uso de la energía. En este estudio se utilizan los indicadores propuestos en el Protocolo de Auditoría Energética del IDEA (IDAE, 2008). Los indicadores más destacados son:

- **IDE - Índice de Dependencia Energética (%):** Representa el porcentaje de agua que es bombeado frente al total de agua que entra en la CR. Se calcula como:



$$IDE = \frac{V_B}{V_0}$$

- $V_B$  = Volumen total bombeado.
- $V_0$  = Volumen total que entra al sistema.

• **ICE - Índice de Carga Energética (m):** Representa la altura manométrica media suministrada por los bombes. Se calcula como:

$$ICE = \frac{\sum V_{B,i} \cdot H_i}{V_0}$$

- $V_{B,i}$  = Volumen impulsado por el grupo de bombeo i.
- $H_i$  = Presión manométrica aportada por el grupo de bombeo i (m).
- $V_0$  = Volumen que entra al sistema.

• **EEB - Eficiencia Energética de Bombes (%):** Representa el porcentaje de potencia absorbida que se transmite al fluido en forma de potencia hidráulica. Se puede calcular según la siguiente fórmula, tanto para un grupo de bombeo ( $EEB_i$ ) como para el total de la instalación (EEB):

$$EEB_i = \frac{\gamma \cdot V_{B,i} \cdot H_i}{3600 \cdot E_i}$$

$$EEB = \frac{\sum EEB_i \cdot E_i}{E} = \frac{\gamma \cdot \sum V_{B,i} \cdot H_i}{3600 \cdot E} = \frac{\gamma \cdot V_0 \cdot ICE}{3600 \cdot E}$$

- $\gamma$  = Peso específico del fluido (9,8 en el caso del agua) ( $\text{kN/m}^3$ ).
- $V_{B,i}$  = Volumen impulsado por el grupo de bombeo i ( $\text{m}^3$ ).
- $H_i$  = Presión manométrica aportada por el grupo de bombeo i (m).
- $E_i$  = Energía consumida por el grupo de bombeo i (kWh).
- $E$  = Energía total consumida por los bombes de la instalación (kWh).
- $V_0$  = Volumen total que entra al sistema ( $\text{m}^3$ ).
- ICE = Índice de carga energética (m).

• **ESE - Eficiencia de Suministro Energético (%):** Representa el cociente entre la energía necesaria a aportar al sistema y la energía real aportada. Se puede calcular como:

$$ESE = \frac{\Delta E}{ICE} = \frac{\sum (Z_j + P_j) \cdot S_j}{ICE \cdot S} - H_0$$

$$H_0 = \frac{\sum (Z_k + P_k) \cdot V_k}{V_0}$$

- $Z_j$  = Cota del hidrante j (m).
- $P_j$  = Presión manométrica requerida en el hidrante j (m).
- $S_j$  = Superficie regada por el hidrante j.
- $S$  = Superficie regada total.
- $Z_k$  = Cota media del punto de captación k (m).

- $P_k$  = Presión manométrica en el punto de captación k (m).
- $V_k$  = Volumen del punto de captación k que entra al sistema.
- $V_0$  = Volumen total que entra al sistema.
- ICE = Índice de carga energética (m).

• **EEG - Eficiencia de Energética General de la CCRR (%)**: Representa la eficiencia energética general de la red de distribución de toda la CCRR. Se calcula como:

$$EEG = EEB \cdot ESE$$

- EEB = Eficiencia energética de bombeos (%).
- ESE = Eficiencia de suministro energético (%).

• **PME - Precio Medio de la Energía (€/kWh)**: Representa el cociente entre el gasto energético final (incluyendo todos los términos) y el consumo energético. Es un indicador que permite comparar distintas tarifas eléctricas y/o calendarios de funcionamiento.

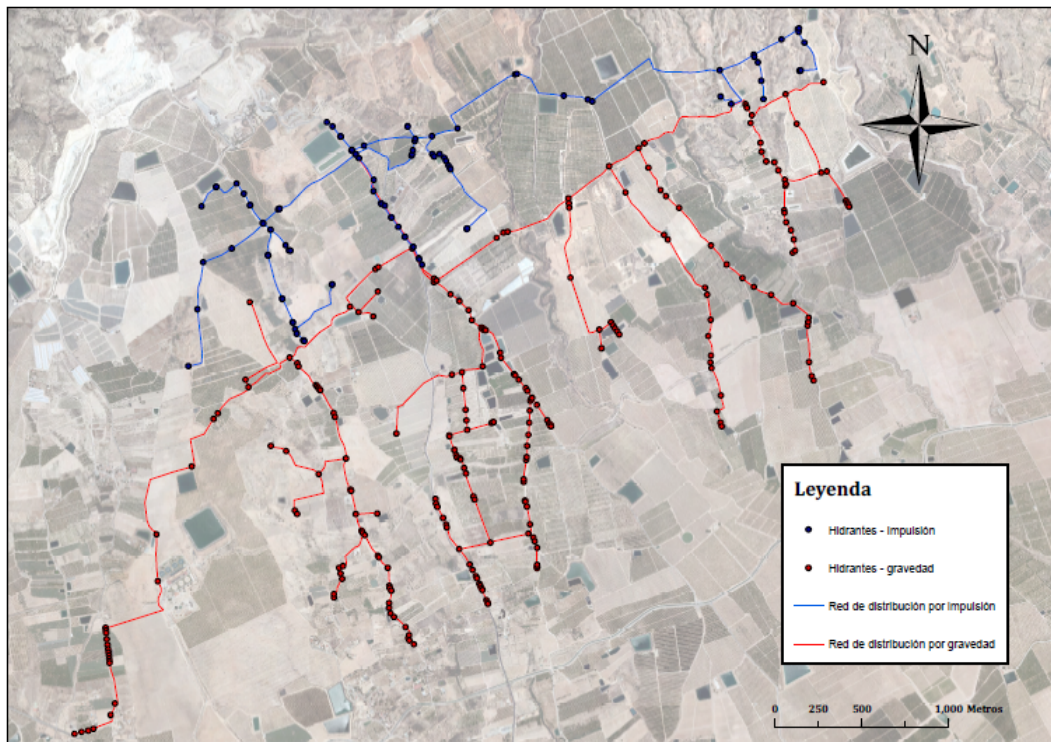
### 2.3 Análisis de las propuestas de mejora

Las propuestas de mejora tienen como objetivo reducir la dependencia energética (IDE), maximizar la eficiencia energética de la instalación (EEG) o minimizar su coste (PME). La mejora de la EEG supone incrementar la eficiencia de los bombeos (EEB), o mejorar la eficiencia de suministro (ESE), lo que implica reducir la carga energética (ICE).

Identificada una actuación que permita mejorar alguno de los indicadores mencionados se analiza su viabilidad económica, mediante la obtención de los beneficios económicos y la estimación de sus costes de ejecución. Para ello se obtienen indicadores de rentabilidad económica, como el VAN, que permiten justificar la viabilidad económica de la actuación y comparar entre distintas propuestas.

### 2.4 Caso de estudio

El procedimiento descrito se ha aplicado en la red de riego de la CCRR Murada Norte. Esta instalación cuenta con una dotación hídrica anual de 2 hm<sup>3</sup> procedentes del canal del trasvase Tajo-Segura, regando una superficie de 1.000 ha. La red consta de un grupo de bombeo de captación, que impulsa el agua desde el canal del trasvase hasta dos balsas de regulación, situadas 115 m por encima del punto de captación (cota 125 msnm). De las balsas de regulación se abastece a los comuneros mediante dos redes de distribución independientes, una de ellas utilizando un segundo bombeo y la otra directamente por gravedad. En la siguiente figura (Figura 1) se representan en un mapa las dos redes de distribución.



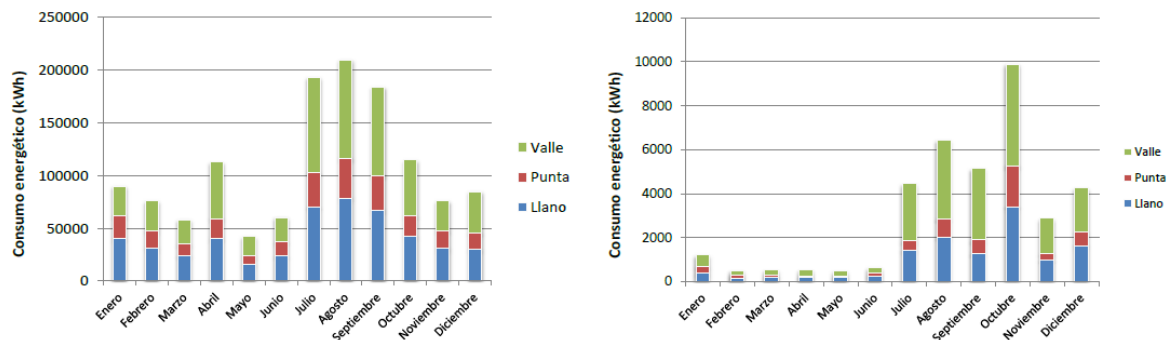
**Figura 1.** Mapa de la CCRR en el que se representan la red de distribución (rojo) por gravedad y la red de distribución con impulsión (azul).

La estación de bombeo de captación consta de un equipo principal de 295 kW y un segundo equipo de reserva de 215 kW. La altura manométrica media de este grupo de bombeo es de 125 m. La tubería de impulsión hasta las balsas es DN 500 mm de Fibrocemento. La capacidad de regulación total de las balsas es de 228.000 m<sup>3</sup>, con una cota media de la lámina de agua de 236 msnm. La mayor parte de la red de distribución es de PVC. Aproximadamente 2/3 de la superficie se riegan con la red de distribución por gravedad y el restante 1/3 con la red que requiere una segunda impulsión. La estación de bombeo de abastecimiento en baja consta de tres grupos de bombeo que funcionan con velocidad variable, dos de ellos de 90 kW y el tercero de 15 kW. Estos equipos de bombeo suministran una presión de 30 m. Finalmente la presión que se requiere en hidrantes es de 25 m. Con esta información se han realizado los modelos de ambas redes de distribución (Figura 2).



**Figura 2.** Modelos en EPANET de las redes de distribución por gravedad (izquierda) y por impulsión (derecha).

El período de análisis adoptado en este trabajo es un año, comprendiendo el consumo energético durante el año 2013. En este período se consumen un total de 1.300.851 kWh en la estación de bombeo en alta (bombeo de captación), y 36.972 kWh (3% del consumo total) en la estación de bombeo en baja. La tarifa eléctrica contratada es la 3.1. A, con discriminación horaria en tres períodos: punta, llano y valle. En los siguientes gráficos (Figura 3) se representan la distribución mensual del consumo energético de ambas estaciones de bombeo, distinguiendo qué cantidad corresponde a cada período tarifario.



**Figura 3.** Evolución del consumo energético de la estación de bombeo en alta (izquierda) y en baja (derecha) durante el año 2013.

### 3- Resultados y discusión

#### 3.1 Calificación energética

En la siguiente tabla (Tabla 1) se resumen los valores de los indicadores de gestión energética aplicados a la red de riego analizada.

**Tabla 1.** Valores de los principales indicadores de gestión energética.

INDICADOR	VALOR
IDE: Índice de dependencia energética (%)	100,00
ICE: Índice de carga energética (m)	136,65
EEB: Eficiencia energética de bombeos (%)	56,84
ESE: Eficiencia de suministro energético (%)	64,22
EEG: Eficiencia energética general de la CCRR (%)	36,50
PME: Precio medio de la energía (cts€/kWh)	14,98

De acuerdo con el protocolo de auditoría energética en CCRR del IDAE, se obtiene una calificación energética de C (Eficiencia Normal). La calificación de la eficiencia del bombeo también sería de C (Normal).

### 3.2 Construcción de una nueva balsa de regulación

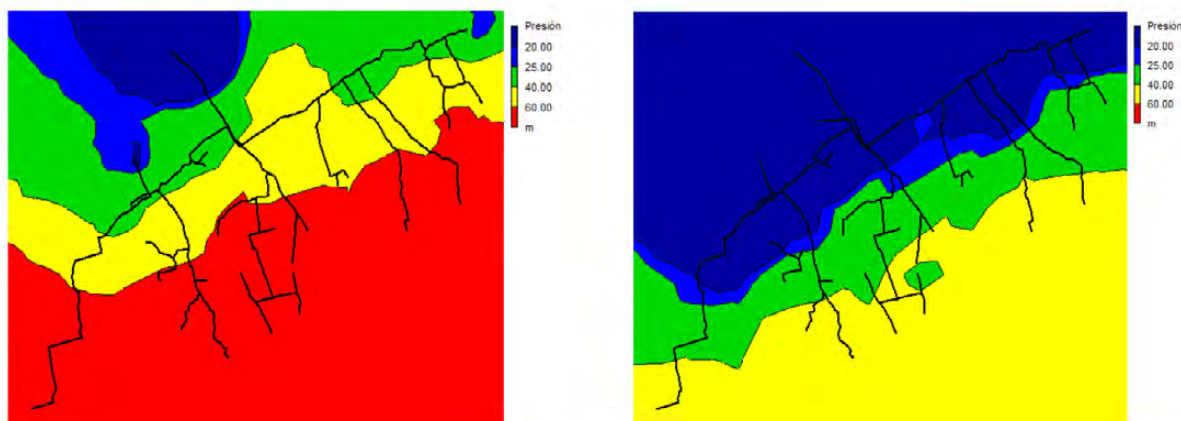
Gracias a la simulación con EPANET se observa que se producen presiones superiores a los 60 mca en casi el 50% de la superficie regada, valor que no es recomendable sobrepasar en este tipo de instalaciones. Parte de esta excesiva presión es disipada por Válvulas Reductoras de Presión colocadas en la red de distribución por gravedad, lo cual constituye una ineficiencia energética reflejada en un menor valor de ESE.

Con el objetivo de aumentar el ESE (reducir el ICE) y reducir las presiones producidas en la red se plantea la construcción de una nueva balsa de regulación a menor cota de las ya existentes. Además de la construcción de la balsa, esta actuación requerirá colocar un nuevo grupo de bombeo y una nueva tubería de conexión con la captación y con la estación de filtrado de cabecera. De entre distintas posibilidades de ubicación de la balsa se concluye que la alternativa para la que se obtienen mayores beneficios es la construcción de una balsa de 38.500 m<sup>3</sup> con la lámina de agua a la cota 204 msnm.

**Tabla 2.** Indicadores económicos de la construcción de la nueva balsa.

INDICADOR	VALOR
Costes de inversión (€)	1.068.884
Beneficios anuales (€/año)	25.585,35
Coste de inversión/Beneficios anuales (años)	41,78
VAN (25 años con tasa de interés del 4%) (€)	- 669.187,62

Al obtener un VAN negativo se concluye que la propuesta de mejora no resulta rentable económicamente. Sin embargo esta actuación quedaría justificada en el caso en que sea necesaria la construcción de una nueva balsa por necesidades de regulación. Además permite reducir la presión significativamente en los puntos más bajos de la red, como se observa en la Figura 4, lo que supondría unos beneficios en mantenimiento no contabilizados.



**Figura 4.** Simulación de las curvas de presión con el modelo de EPANET antes de la actuación (izquierda) y después (derecha).



### 3.3 Nuevos equipos de bombeo para el abastecimiento en alta

Con el objetivo de reducir la potencia contratada en período punta, donde la tarifa de acceso es un 700% mayor que en período valle (2014), se plantea añadir un nuevo grupo de menos potencia en la estación de bombeo en alta, de manera que sólo este equipo trabaje en puntas, y conjuntamente con el equipo principal en llano y valle. Con esta condición se obtiene un caudal mínimo necesario de 25,39 l/s. Se selecciona una bomba multicelular APM 100/6 de 60 kW (Bombas IDEAL 2014), capaz de suministrar 32 l/s a 125 m. En la siguiente tabla (Tabla 3) se observan los resultados del análisis económico.

. **Tabla 3.** Indicadores económicos de la instalación del equipo de bombeo de 60 kW.

INDICADOR	VALOR
Costes de inversión (€)	22.800
Beneficios anuales (€/año)	16.524,28
Coste de inversión/Beneficios anuales (años)	1,38
VAN (20 años con tasa de interés del 4%) (€)	201.770,36

La estación de bombeo en alta presenta un EEB de 56,71% (Eficiencia Normal). Puesto que se trata de un bombeo que trabaja en un punto de funcionamiento (PF) fijo, lo ideal sería que el PF coincidiera con la máxima eficiencia del bombeo. Con el objetivo de mejorar el EEB se plantea la sustitución del equipo principal de la estación de bombeo en alta por un equipo que ofrezca una mayor eficiencia energética para el PF objetivo (125 m). En este caso se selecciona una bomba multicelular APM 200/2 con una eficiencia total del 72% y una potencia de 240 kW (Bombas IDEAL 2014), capaz de suministrar 140 l/s a 125 m. A continuación (Tabla 4) se observan los indicadores de viabilidad económica.

**Tabla 4.** Indicadores económicos de la instalación del equipo de bombeo de 240 kW.

INDICADOR	VALOR
Costes de inversión (€)	94.400
Beneficios anuales (€/año)	29.351
Coste de inversión/Beneficios anuales (años)	3,22
VAN (20 años con tasa de interés del 4%) (€)	304.489,53

### 3.4 Contratación de la tarifa 6.1.

La principal ventaja de esta tarifa radica en que durante el mes de agosto, mes de mayor consumo energético en el caso de estudio, se aplica el período tarifario valle. Realizando una estimación de costes se obtienen unos beneficios aproximados de 42.818 €/año (impuestos incluidos) con esta tarifa, según datos de facturación de 2013 y tarifa de acceso de 2014.

### 3.5 Análisis comparativo del conjunto de mejoras propuestas

Por tanto, para mejorar el uso de la energía en el caso analizado se proponen las siguientes cuatro actuaciones:



- Con el objetivo de aumentar el ESE se plantea la construcción de una nueva balsa de regulación.
- Para reducir la potencia contratada en horario punta se plantea la colocación de un nuevo grupo de bombeo en la estación de captación.
- Con la finalidad de incrementar el EEB se plantea la sustitución del grupo principal de la estación de bombeo en alta.
- Con el objetivo de reducir el PME se propone un cambio a la tarifa 6.1.

En la Tabla 5 se comparan los indicadores iniciales con los obtenidos al aplicar todas las mejoras y al aplicar todas salvo la construcción de la nueva balsa.

**Tabla 5.** Comparación de los indicadores de gestión energética antes de las mejoras, aplicando todas las mejoras, y aplicando todas las mejoras menos la nueva balsa.

INDICADOR	SITUACIÓN INICIAL	TODAS LAS MEJORAS	MEJORAS SIN BALSA
IDE: Índice de dependencia energética (%)	100,00	100,00	100,00
ICE: Índice de carga energética (m)	136,65	124,59	136,65
EEB: Eficiencia energética de bombeos (%)	56,84	67,9	69,1
ESE: Eficiencia de suministro energético (%)	64,22	70,43	64,22
EEG: Eficiencia energética general de la CCRR (%)	36,50	47,82	44,38
PME: Precio medio de la energía (cts€/kWh)	14,98	9,94	10,66
E: Consumo energético total de la CCRR (kWh/año)	1.337.823	866.699	1.047.994
Inversión inicial (€)	0	1.186.084	117.200
VAN medio anual (20 años con tasa de interés del 4%) (€/año)	0	18.350	54.408,54
Calificación Energética del Bombeo	C	A	A
Calificación Energética de la CCRR	C	B	B
Grupo de Consumo Energético	Gran Consumidora	Consumidora	Gran Consumidora

Como se puede comprobar, con todas las mejoras propuestas se estima un ahorro energético del 35% sobre el consumo inicial (471 MWh/año), mejorando la calificación



general a Buena (48%), además de un beneficio medio anual de 18.350 €/año. Sin incluir la construcción de la nueva balsa en el paquete de mejoras, se obtienen beneficios anuales medios mucho mayores con muy poca inversión, 54.409 €/año con una inversión inicial de tan solo 117.200 €, aunque el ahorro energético es menor con un 22% sobre el consumo inicial (290 MWh/año).

#### 4- Conclusiones

La caracterización de la red de riego y la aplicación de los indicadores de gestión energética propuestos en el Protocolo de Auditoría Energética en CCRR ha permitido calificar el consumo de la CCRR Murada Norte. Con el objetivo de mejorar estos indicadores se plantean actuaciones que han permitido reducir el consumo y coste energético de la CCRR.

El procedimiento llevado a cabo en este estudio, aplicable en otras CCRR, resulta ser una herramienta útil para alcanzar una gestión eficiente de estas instalaciones, permitiendo el planteamiento de alternativas de actuación con repercusiones ambientales y económicas favorables.

#### 5- Agradecimientos

Los autores de este trabajo muestran su agradecimiento a la CCRR Murada Norte por su participación en este estudio y al proyecto IMPADAPT (CGL2013-48424-C2-1-R) del Plan Estatal de I+D+i (Ministerio de Economía y Competitividad) por su financiación.

#### 6.- Bibliografía

- Corominas, J. (2010). *Agua y energía en el riego, en la época de la sostenibilidad*. Ingeniería del Agua, 17, 219-233.
- Del Campo, A. (2014). *El factor de la energía en los grandes usuarios del agua*. Día Mundial del Agua 2014. Sede del Canal Isabel II, Madrid.
- Hardy L. y Garrido A. (2010). *Análisis y Evaluación de las Relaciones entre el Agua y la Energía en España*. Fundación Botín, Madrid.
- IDAE (2008). *Ahorro y Eficiencia Energética en las Comunidades de Regantes*. Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía, Madrid: Ministerio de Industria, Comercio y Turismo.
- IDAE (2008). *Protocolo de Auditoría Energética en Comunidades de Regantes*. Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía, Madrid: Ministerio de Industria, Comercio y Turismo.
- Jiménez M.A. (2008). *Integración de los procesos agronómicos e hidráulicos del riego a presión en un entorno SIG para la gestión eficiente de Comunidades de Regantes*. Grupo REDHISP, Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente, Valencia: Univesitat Politècnica de València.
- WWAP (2014). *The United Nations World Water Development Report 2014: Water and Energy*. United Nations World Water Assesment Programme, Paris: UNESCO.



## BLOQUEO DE CONTADORES DE CHORRO MÚLTIPLE EN HIDRANTES MULTIUSUARIO PARA RIEGO

*Palau Estevan C. V.<sup>1</sup>(P), Balbastre Peralta, I<sup>2</sup>, Arviza Valverde, J.<sup>3</sup>, Sanchis Alos, L.<sup>4</sup>*

<sup>1</sup> Docente e Investigador, UD Hidráulica, Dpto. DIRA Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, [virpaes@agf.upv.es](mailto:virpaes@agf.upv.es)

<sup>2</sup> Responsable, Laboratorio Ingeniería Rural, Hidráulica y Riegos (LIHR), Dpto. DIRA Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, [ibbalpe@agf.upv.es](mailto:ibbalpe@agf.upv.es)

<sup>3</sup> Docente e Investigador, UD Ingeniería Rural, Dpto. DIRA Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, [jarviza@agf.upv.es](mailto:jarviza@agf.upv.es)

<sup>4</sup> Técnico de Laboratorio, Laboratorio Ingeniería Rural, Hidráulica y Riegos (LIHR), Dpto. DIRA Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, [luisanal@upvnet.upv.es](mailto:luisanal@upvnet.upv.es)

### Resumen

Los contadores de chorro múltiple son elementos importantes en los hidrantes multiusuario de redes de riego, ya que son los encargados de contabilizar el volumen de agua consumido en cada parcela. La precisión en la medida de estos consumos repercutirá en el recibo del propio agricultor y en un reparto del agua más equitativo entre los miembros de la Comunidad de Regantes.

Sin embargo, su funcionamiento se ve afectado por múltiples parámetros como la calidad del agua, su posición de instalación, su inadecuado dimensionado, su envejecimiento, etc... (Pérez Perucha *et al.* 2011, Madurga *et al.* 2011, Palau *et al.* 2010, Arregui *et al.* 2007).

En el presente trabajo se estudia mediante diferentes pruebas en el Laboratorio de Ingeniería Rural de la Universitat Politècnica de València, un fenómeno que les ocurre a menudo; el bloqueo de la turbina en contadores de velocidad cuando durante un corto periodo de tiempo circulan por ellos caudales anormalmente altos.

Tras el estudio, se han encontrado problemas de bloqueo en la medición de los contadores de chorro múltiple por un diseño inadecuado en la configuración del hidrante multiusuario.

### Abstract

Multi-jet meters are important elements installed in hydrants of irrigation networks. These instruments measure the volume of water consumed in each plot. The measurement accuracy of these consumptions can vary the bill of the farmer and will distribute in a more equitable manner the water among the members of the Irrigation Community. However, its performance is affected by many parameters such as water quality, meter installation position, meters dimension, aging, etc ... (Pérez Perucha *et al.* 2011, Madurga *et al.* 2011, Palau *et al.* 2010, Arregui *et al.* 2007 ).

In this work is studied in the Laboratory of Agricultural Engineering at the Universitat Politècnica de València, under different situations, the performance of multi-jet meters. Particularly, a phenomenon that often happens. The blocking of the turbine when during a short period of time the flow is abnormally high.

After the study, it has been found that blocking is a common problem in the measurement of multi-jet meters when there is an inadequate design of the hydrant.

## 1- Introducción y objetivos.

Los contadores de chorro múltiple son elementos importantes en los hidrantes multiusuario de redes de riego, ya que son los encargados de contabilizar el volumen de agua consumido en cada parcela. La precisión en la medida de estos consumos repercutirá en el recibo del propio agricultor y en un reparto del agua más equitativo entre los miembros de la Comunidad de Regantes.

Sin embargo, el funcionamiento de los mismos se ve afectado por múltiples parámetros como la calidad del agua, su posición de instalación, su inadecuado dimensionado, su envejecimiento, etc...(Pérez-Perucha *et al.* 2011, Madurga *et al.* 2011, Palau *et al.* 2010, Arregui *et al.* 2007).

Un fenómeno que les ocurre a menudo a este tipo de instrumentos es el bloqueo de la turbina en contadores de chorro múltiple cuando durante un corto periodo de tiempo circulan por ellos caudales anormalmente altos.

En los contadores de chorro múltiple la velocidad de giro de la turbina depende de la velocidad de impacto del agua sobre la misma. Cuando los caudales son muy altos el impacto será superior produciéndose un desacople en la transmisión magnética que une la turbina con totalizador (Figura 1). De esta forma, el totalizador queda bloqueado y sin movimiento, dejando de contabilizar el agua consumida.

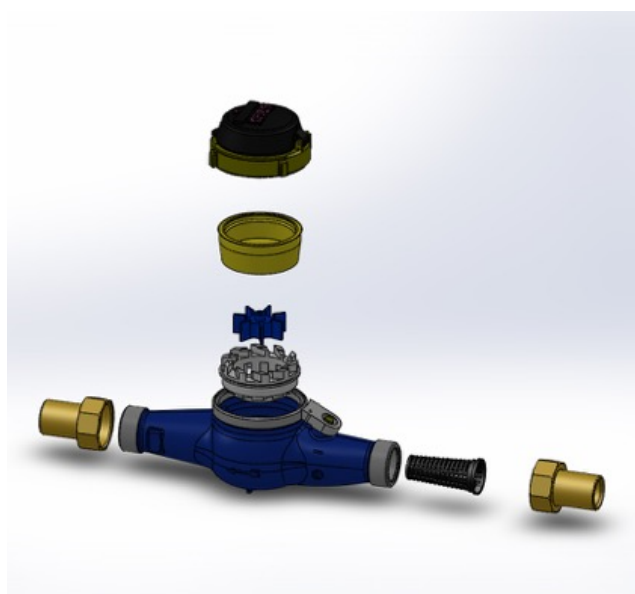


Figura 1. Despiece de un contador de chorro múltiple.

Pero, ¿en qué casos se producen estas condiciones de caudal anormalmente altos? Generalmente, en situaciones donde el diferencial de presiones entre la entrada al instrumento (aguas arriba) y la salida del mismo (aguas abajo) es alta. Esto se produce durante el llenado de la red de riego estando vacía. En esta situación, el gradiente de presión es alto ya que se vierte a la atmósfera y los caudales de llenado que se consiguen son muy elevados, en consecuencia, las velocidades de impacto son muy altas.

En el presente trabajo se estudia el fenómeno bajo diferentes condiciones de trabajo evaluando la influencia que tiene la posición de instalación del contador y el posible desgaste generado tras sucesivos bloqueos de la turbina.

## 2- Materiales y métodos.

El estudio del bloqueo de estos instrumentos de medida se lleva a cabo en el banco de ensayo de contadores del Laboratorio de Ingeniería Rural de la Universitat Politècnica de València (UPV) (Figura 2a). Este banco de ensayo dispone de la tecnología adecuada para la realización de pruebas metrológicas de contadores hasta un caudal máximo de 235 m<sup>3</sup>/h (Balbastre *et al.* 2012).

El bloqueo de la turbina es habitual en contadores de chorro múltiple. Actualmente se está llevando a cabo un muestreo en diferentes Comunidades de Regantes donde se analiza por calibre la cantidad de instrumentos que presentan esta anomalía.

En el laboratorio se han ensayado algunas de estas muestras por calibres. Para ello, en diferentes posiciones de colocación y direcciones del flujo de agua, se prueban los instrumentos hasta aproximadamente caudales que duplican el caudal máximo establecido por el fabricante. De forma visual se determina si se ha producido bloqueo del totalizador, y en caso afirmativo, se anota el caudal al que se ha producido. Las pruebas realizadas son las siguientes:

- ensayo de bloqueo en posición horizontal
- ensayo de bloqueo en posición horizontal con el totalizador girado 90°.
- ensayo de bloqueo en posición vertical (Figura 2b)



**Figura 2.** (a) Laboratorio de Ingeniería Rural de la UPV, (b) Posición vertical de ensayo.

Por otro lado, se ha comprobado la metrología inicial de los instrumentos en posición vertical para poder comprobar la evolución sufrida tras múltiples bloqueos.

En este caso, el método de ensayo es por gravimetría, aforando el agua durante un tiempo determinado a unos depósitos que disponen de células de carga para realizar la pesada. El volumen de agua acumulado en el depósito se contrasta con la diferencia de lecturas del contador, estimando de esta forma el error a diferentes caudales de ensayo. Los ensayos se realizaron a contador lanzado con la toma instantánea de lectura mediante

fotografía para determinar volumen trasegado y el tiempo. El error de medida de un contador de agua a un determinado caudal se estimará mediante la ecuación 1:

$$Error (\%) = \left( \frac{Q_{\text{contador}} - Q_{\text{pesada}}}{Q_{\text{pesada}}} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

El ensayo metrológico en posición horizontal permite conocer el comportamiento del instrumento y determinar la curva de error en todo el rango de medida, tal y como recomienda el fabricante. También, se estudia la colocación en horizontal pero con el totalizador girado 90° y su funcionamiento en posición vertical. Esta disposición es la más habitual en los hidrantes multiusuario de redes colectivas.

Finalmente, se analizó el desgaste que puede producir sobre el contador 30, 60 y 90 bloqueos sucesivos de la turbina.

Los contadores estudiados son de chorro múltiple y presentan las siguientes características metrológicas (Tabla 1):

**Tabla 1.** Contadores ensayados.

Calibre	nº ensayado	Qt (l/h)	Qn (m³/h)	Qmax (m³/h)	Clase metrológica
DN15	15	120	1,5	3	B
DN 20	14	200	2,5	5	B
DN25	7	280	3,5	7	B
DN30	16	480	6	12	B
DN40	6	800	10	20	B

### 3- Resultados y discusión.

Los resultados obtenidos en cada ensayo se muestran en forma de tablas y gráficos clasificados por calibre de contador. Se analizan las diferentes pruebas ordenadas como ensayo del bloqueo en función de la posición, ensayo de metrología en función de la posición y ensayo del desgaste por bloqueos sucesivos.

#### 3.1- Ensayo del bloqueo de contadores.

##### Contadores DN15

**Tabla 2.** Resultados bloqueo de contadores DN15.

DN 15	Q bloqueo (m³/h)	Porcentaje (%)
Horizontal	-	No se bloquea
Horizontal girado	-	No se bloquea
Vertical flujo descendente	5,8	53
Vertical flujo ascendente	6	67

Los ensayos han mostrado que en posición horizontal y horizontal girado no se produce bloqueo del instrumento. En cambio, cuando el contador se encuentra en vertical con el flujo de agua descendente el 53% de la muestra se bloquea. Se observa que el



caudal de bloqueo de la turbina es aproximadamente el doble del caudal máximo ( $Q_{max} = 3$  m<sup>3</sup>/h). Esta configuración es la más habitual en los hidrantes multiusuarios donde se ha constatado el problema en diversas comunidades de regantes (Figura 3).



**Figura 3.** Hidrante multiusuario con contadores en posición vertical y flujo descendente.

Se ha probado el efecto que produce sobre el bloqueo un flujo ascendente en aquellos contadores que sufrían bloqueo en vertical con el flujo descendente, y se observa que el 67% continúa bloqueándose en esta posición, sin encontrar una mejora significativa.

#### Contadores DN20

**Tabla 3.** Resultados bloqueo de contadores DN20.

DN20	Q bloqueo (m <sup>3</sup> /h)	Porcentaje (%)
Horizontal	-	No se bloquea
Horizontal girado	8	Si se bloquea*
Vertical descendente	9,97	100
Vertical flujo ascendente	10,9	67

\*muestra de contadores ensayada no significativa.

Los ensayos han mostrado una tendencia similar al calibre DN15 (Tabla 3). En este caso, en posición vertical con flujo descendente el 100% de los contadores han sufrido bloqueo aproximadamente al doble del caudal máximo ( $Q_{max} = 5$  m<sup>3</sup>/h), recuperando su movimiento un 60% de la muestra a caudal nominal.

#### Contadores DN25

**Tabla 4.** Resultados bloqueo de contadores DN25.

DN 25	Q bloqueo (m <sup>3</sup> /h)	Porcentaje (%)
Horizontal	-	No se bloquea
Horizontal girado	-	-
Vertical descendente	13,4	100
Vertical flujo ascendente	14,1	100

En la prueba en vertical para este calibre, tanto con el flujo descendente como ascendente, el 100% de los contadores de chorro múltiple presentan bloqueo al doble del caudal máximo ( $Q_{max} = 7 \text{ m}^3/\text{h}$ ). Todos ellos, recuperan su medición a caudal inferior al caudal nominal. En posición horizontal no se produce el fenómeno de bloqueo.

### Contadores DN30

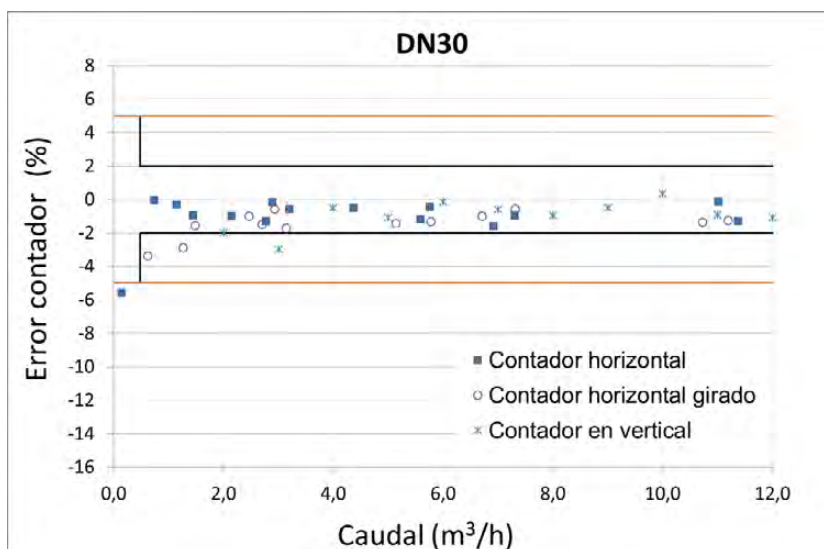
**Tabla 5.** Resultados bloqueo de contadores DN30.

DN 30	Q bloqueo ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	Porcentaje (%)
Horizontal	-	No se bloquea
Horizontal girado	20,2	75
Vertical descendente	16	100
Vertical flujo ascendente	15,8	100

La tendencia vuelve a ser parecida, en posición horizontal no sufren bloqueo, mientras que en posición vertical, tanto con el flujo descendente como ascendente, el 100% de los contadores presentan bloqueo pero en este caso ligeramente superior al caudal máximo

( $Q_{max} = 12 \text{ m}^3/\text{h}$ ). En posición horizontal girado, es decir, con el eje de la turbina en horizontal, se bloquea el 75% de la muestra.

Si representamos los resultados obtenidos para cada una de las posiciones de instalación se observa que la curva metrológica de un contador de chorro múltiple, por el propio diseño del instrumento, no varía significativamente en su metrología estando dentro de los límites establecidos en la norma UNE EN 14268 Técnicas de Riego: Contadores de agua para riego que establece un error máximo del  $\pm 5\%$  en todo el rango de medida y también en los de la Orden Ministerial del 28 de diciembre 1988, más restrictiva, del  $\pm 5\%$  entre  $Q_{minimo}$  y  $Q_{transición}$  y del  $\pm 2\%$  hasta el  $Q_{máximo}$  (Figura 4).



**Figura 4.** Curva de error de contadores DN30 tras bloqueo en distintas posiciones.

## Contadores DN40

**Tabla 6.** Resultados bloqueo de contadores DN40.

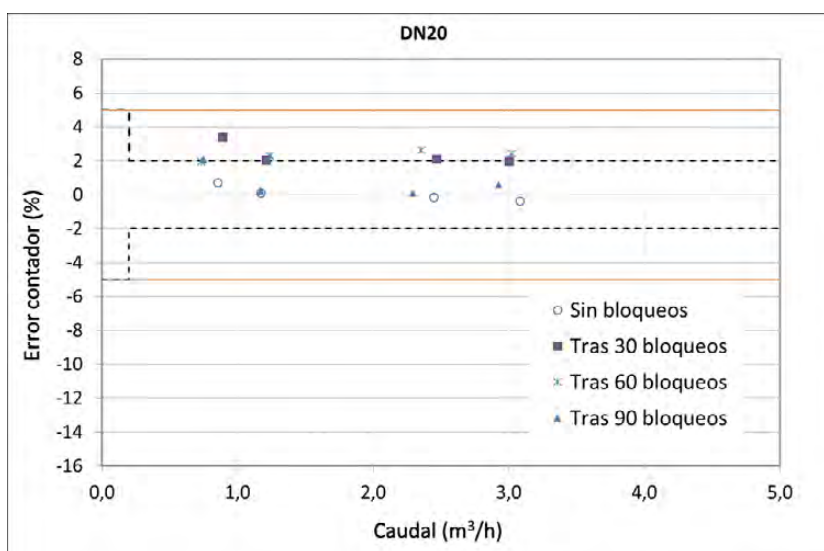
DN 40	Q bloqueo (m <sup>3</sup> /h)	Porcentaje (%)
Horizontal	-	No se bloquea
Horizontal girado	-	No se bloquea
Vertical descendente	39,8	40
Vertical flujo ascendente	-	No se bloquea

Para DN40 los resultados son un poco distintos. Se observa que en posición vertical solo un 40% de la muestra presenta bloqueo al doble del caudal máximo ( $Q_{max} = 20 \text{ m}^3/\text{h}$ ), y que si el flujo es ascendente se corrige el bloqueo, no parándose el contador.

### 3.2- Ensayo de desgaste tras sucesivos bloqueos en posición vertical.

En una primera prueba se analizó la curva metrológica inicial de algunos de los contadores de calibres DN 20 y DN 30 que sí sufrían parada en su medición en posición vertical, antes de someterlos a sucesivos bloqueos.

Los resultados muestran que los sucesivos bloqueos de la turbina no han producido desgaste alguno en el mecanismo interno del contador, lográndose medidas cuyo error es inferior al  $\pm 5\%$  establecido por la norma (Figura 5, Figura 6 y Figura 7).



**Figura 5.** Curva de error de un contador DN20 tras sucesivos bloqueos.

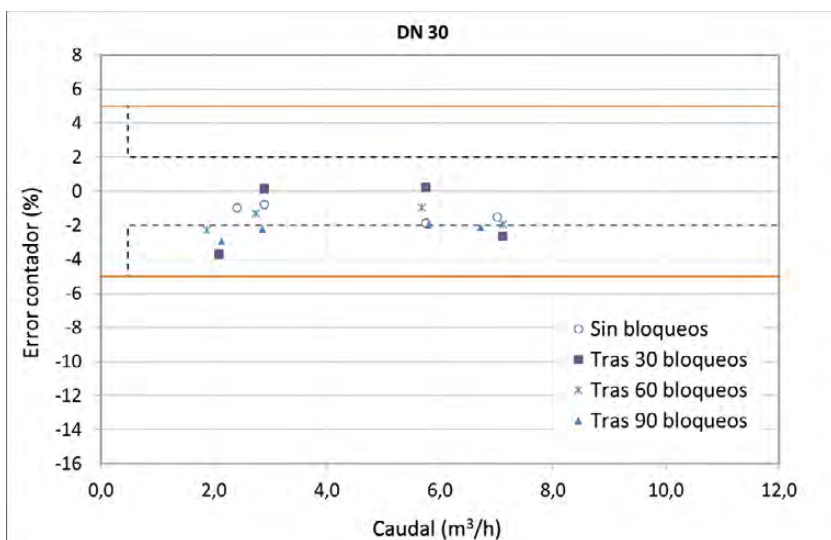


Figura 6. Curva de error de un contador DN30 tras sucesivos bloqueos.

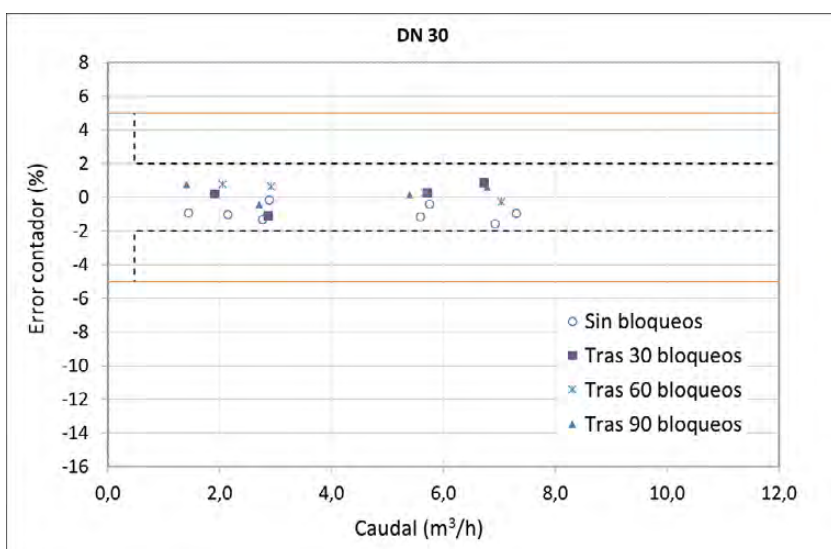


Figura 7. Curva de error de un contador DN30 tras sucesivos bloqueos.

Analizando el ensayo a caudal nominal no se observa ninguna tendencia clara tras producir en el instrumento 30, 60 y 90 bloqueos sucesivos, como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Error promedio de la muestra ensayada a caudal nominal tras sucesivos bloqueos

BLOQUEOS				
nº bloqueos sucesivos	0	30	60	90
Error promedio a Qn (%)	-0,46	0,51	0,72	-0,37

#### 4- Conclusiones y recomendaciones.

Tras el estudio, se han encontrado problemas de bloqueo en la medición de los contadores de chorro múltiple por un diseño inadecuado en la configuración del hidrante multiusuario. La colocación del instrumento en posición vertical incrementa el riesgo de desacople de la transmisión magnética de la turbina con el totalizador del contador cuando



los caudales son anormalmente elevados. Con una posición horizontal del contador, cuando el eje de la turbina se encuentra el vertical, este fenómeno rara vez se produce.

Durante el periodo de riego el caudal es estable, y si el contador está bien dimensionado, este estará próximo a su caudal nominal. Solo cuando se produce el llenado de la red de riego, donde se producen gradientes de presión importantes, se dan caudales muy altos que pueden superar ampliamente el rango de trabajo del contador afectando a su funcionamiento. Estos gradientes de presión serán más elevados cuando exista desnivel importante entre hidrante y parcela, y además, se vierta directamente a la atmósfera.

Por otro lado, la curva de error de los contadores de chorro múltiple en posición vertical no se ve afectada significativamente tras sucesivos bloqueos de la turbina, es decir, no se ha detectado desgaste de sus engranajes internos. No obstante, tanto la muestra ensayada como el número de bloqueos sucesivos es insuficiente, y no permite ser concluyentes con la evolución que puede sufrir el instrumento por esta causa.

La verificación de estos problemas de bloqueo ha conducido al estudio de nuevas configuraciones en horizontal del hidrante multiusuario y al ensayo de elementos hidráulicos que limiten estos caudales punta puede evitar el bloqueo.

## 5- Bibliografía.

- Arregui F., Cabrera E., Cobacho R., (2007). Gestión integral de contadores de agua. IWA Publishig.
- Balbastre I, Sanchis, L., Arviza, J., Manzano, J., Palau, C. V. (2012). Desarrollo y puesta a punto del banco de ensayo para elementos hidráulicos en el Laboratorio de Ingeniería Rural (LIR) de la UPV. Poster pp. 167-168. XXX Congreso Nacional de Riegos (Albacete).
- Madurga C y Ramírez J., (2011). Influencia de la calidad del agua en la metrología de contadores de riego. pp. 151-152. XXIX Congreso Nacional de Riegos (Córdoba).
- Norma UNE EN 14268 (2006). Técnicas de Riego: Contadores de agua para riego.
- Orden ministerial 28 de diciembre de 1988 por la que se regulan los contadores de agua fría (BOE num.5, de 6 de marzo de 1989).
- Palau, C.V.1, Arregui,F., Royuela,A., Manzano,J., Jiménez Bello,M.A. (2010) Auditoria de sistemas de medición de agua en redes de riego. Poster pp. 121-122. XXVIII Congreso Nacional de Riegos (León).
- Pérez-Perucha, J., Madurga C., Sánchez de Ribera, A. (2011). Influencia de la disposición de un contador en su metrología. pp. 149-150. XXIX Congreso Nacional de Riegos (Córdoba).



## CÁLCULO DE LA UNIFORMIDAD DE RIEGO EN LA ZONA DEL GREEN DE UN CAMPO DE GOLF

*Gómez de Barreda Ferraz, D.<sup>1</sup> Bellón Echeverría, J.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Profesor, Departamento de Producción Vegetal. Universitat Politècnica de València. Camino de Vera, S/N 46022 Valencia, [diegode@btc.upv.es](mailto:diegode@btc.upv.es)

<sup>2</sup> Estudiante, ETSICC, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera S/N 46022 Valencia, [jabelec@etsia.upv.es](mailto:jabelec@etsia.upv.es)

### Resumen

En España, el césped es un cultivo de regadío, que dependiendo de la especie cultivada, la zona climática y el uso de la superficie cespitosa, tendrá una demanda de agua muy diferente. Esta demanda es especialmente intensa en la superficie de los campos de golf denominada green, donde se cultiva la cespitosa *Agrostis stolonifera*. Es pues muy importante que el riego en este tipo de superficie sea muy eficiente y uniforme. Se realizó un estudio en los 11 greens de un campo de golf con el objetivo evaluar la uniformidad de riego con vistas a mejorar tanto el consumo de agua como la distribución de la misma. El estudio consistió en distribuir unos recipientes de manera equidistante en la superficie del *green* y tras poner en funcionamiento los aspersores determinar la precipitación obtenida. Se concluye que en este campo de golf la uniformidad de riego es baja, con la consecuencia inmediata de que hay que realizar riegos de apoyo a mano en zonas con menor precipitación. La baja uniformidad de riego observada está directamente relacionada con el ratio superficie del green/nº de aspersores y posiblemente por el diámetro de las tuberías porta aspersores.

### 1- Introducción

En España, el césped es un cultivo de regadío, que dependiendo de la especie cultivada, la zona climática y el uso de la superficie cespitosa, tendrá una demanda de agua muy diferente. Así pues, en los campos de golf y más concretamente en la zona denominada *green*, la demanda es alta pues se cultiva una cespitosa con altas necesidades (*Agrostis stolonifera*), el sustrato es muy arenoso, el juego del golf requiere alta humedad para que la bola ruede rápida y sobre todo, en el área mediterránea las condiciones climáticas inducen un alto consumo de agua. Esta especie cespitosa, cuando está estresada por falta de agua y calor, y no se riega de inmediato adecuadamente, se vuelve marrón y pierde mucha densidad (Dernoeden, 2000) con lo que la rodadura de la bola falla y como consecuencia la utilidad del *green*. Existe un problema añadido, las instalaciones de riego muchas veces están en malas condiciones debido normalmente a su edad y al bajo mantenimiento, por lo que la uniformidad de riego en estas superficies cespitosas suele ser baja. Este problema es el desencadenante de otros problemas secundarios en el césped al presentarse en un mismo *green* zonas encharcadas junto con zonas secas, provocando la aparición de organismos oportunistas (hongos, insectos y malas hierbas) en el césped debilitado.



La evaluación del sistema de riego es pues esencial para evitar la pérdida de competencia del césped. Esta evaluación indica cual es la eficiencia y uniformidad de riego y con esos resultados hay que actuar para mejorar el sistema. La eficiencia del sistema de riego es difícil de cuantificar, pero la uniformidad si y esta última es un buen indicador de la eficiencia (Baum *et al.* 2005). Una uniformidad perfecta, que implica que cualquier parte del área regada recibe la misma cantidad de agua es imposible. De hecho, Carrow *et al.* (2009), indican que una uniformidad de riego del 85% es excelente. Un indicador de la uniformidad de riego es el llamado coeficiente de distribución de la uniformidad que Latif y Ahmad (2008) en un estudio similar sobre el cálculo de la uniformidad de riego en campo de golf lo formulan como el ratio entre la precipitación en el cuartil inferior de una serie de recipientes distribuidos en el césped y el total de los recipientes. Un césped con una uniformidad de riego del 50% implica que hay partes del mismo que reciben la mitad de agua que el resto y por tanto para asegurarse que en esa zona el césped no se seca hay que sobre regar el resto del césped (Kjelgren, *et al.* 2000) con el consiguiente gasto de agua.

A la hora de evaluar la uniformidad de riego surge la duda del tipo de recipiente a utilizar (su diámetro de boca), el número de recipientes por *green* y el tiempo de trabajo de los aspersores. En un interesante estudio realizado por Llorens (2009) se ensayan los 2 últimos parámetros y concluyen que para medir la uniformidad de riego hay que tener como mínimo 10 recipientes por *green* y un tiempo de riego de 5 minutos. En ese estudio se usaron recipientes con un diámetro de boca de 21 cm separados equidistantemente.

Es pues el objetivo de este trabajo, evaluar la uniformidad de riego de los 11 *greens* de un campo de golf con vistas a mejorar tanto el consumo de agua como la distribución de la misma.

## 2.- Materiales y métodos

El estudio se realizó en julio de 2013 en los 11 *greens* del Real Campo de Golf de Manises (Valencia), cuyas características más importantes tanto de los *greens* como de los aspersores que riegan los *greens* pueden observarse en la Tabla 1. Como puede verse en la Tabla 1, la diversidad de *greens* es muy alta, sólo pareciéndose entre ellos los *greens* 1 y 2 y por otro lado los *greens* 8, 9 y Out3.

**Tabla 1.** Características del los *greens* y sus aspersores. Sup.: Superficie; N°: Número; RB: Rain Bird; TR: Toro.

Características del <i>green</i>			Características de los aspersores				Ratio m <sup>2</sup> de <i>green</i> por aspersor
Nombre	Sup. (m <sup>2</sup> )	Forma	N°	Edad (años)	Tipo	Tubería $\phi$ (mm)	
1	234	Circular	4	6	RB900 y RB950	63	59
2	214	Circular	4	6	RB900 y RB950	63	54
3	510	Circular	5	6	RB900 y RB950	63	102
4	371	Ovalada	6	13	RB o TR 700/750	63	62
5	298	Rectangular	4	13	RB o TR 700/750	50	75
6	567	Rectangular	6	13	RB o TR 700/750	63	95
7	481	Ovalada	4	6	RB900 y RB950	63	120
8	235	Circular	5	13	RB o TR 700/750	63	47
9	233	Circular	5	13	RB o TR 700/750	50	47
Out1	254	Circular	4	13	RB o TR 700/750	63	64
Out3	244	Circular	5	13	RB o TR 700/750	63	49

El estudio se realizó entre las 6:30 y 10:30 de la mañana, antes de la aparición de los jugadores y siempre en ausencia de viento. En cada *green* se distribuyeron equidistantemente 24 recipientes de cristal con un diámetro en su extremo superior de 12 cm y una separación entre ellos comprendida en el rango 3,5-5,5 m dependiendo del tamaño del *green*. Se pusieron más recipientes que los mínimos necesarios según Llorens (2009) pues el diámetro de boca era menor. Seguidamente se puso en marcha el sistema de aspersión, imitando la manera de regar del *greenkeeper* del campo en estos *greens*. Se regaba el *green* durante 10 minutos con 2 ó 3 aspersores y otros 10 minutos con otros 2 ó 3 aspersores, midiéndose a continuación el agua caída en los recipientes. De esta forma se determinaba tanto el agua recibida por el césped (precipitación) como la uniformidad de la aplicación (CU).

La uniformidad de la aplicación se calculó mediante la fórmula:

$$CU = (VOL_{.6 \text{ min}} / VOL_{.24}) * 100$$

Siendo  $VOL_{.6 \text{ min}}$  el volumen de agua medio en los 6 recipientes con menor cantidad recogida y  $VOL_{.24}$  el volumen de agua medio recogido en los 24 recipientes. Se utilizó la escala de la Tabla 2 para calificar el CU obtenido de cada *green*.

**Tabla 2.** Escala utilizada. Fuente: Zoldoske (2003) adaptada.

CU (%)	Calificación
> 85	Excelente
80 – 85	Muy bueno
75 - 80	Bueno
70 - 75	Justo
< 70	Pobre

### 3.- Resultados y discusión

La primera observación interesante que surge de los resultados obtenidos es la baja precipitación recogida en los *greens* (Tabla 3), situándose en el rango 2,8 a 5,2 l/m<sup>2</sup> de media del campo de golf. Esta poca precipitación, unido a que se riega casi de forma diaria aproximadamente durante 2/3 partes del año, indica que los riegos son ligeros y frecuentes, lo contrario a lo recomendado para el césped (Vargas & Turgeon, 2004) pues las raíces de las cespitosas no profundizarán. En segundo lugar, en la misma tabla se observa que existe una gran variabilidad en la precipitación obtenida, con diferencias entre la precipitación caída en diferentes partes del *green* que pueden llegar a ser de hasta 4,9 l/m<sup>2</sup> lo que condena a los *greens* a ser sobre regados o a tener un déficit de agua y tener que actuar posteriormente con riego suplementario a mano.

En la misma Tabla 3 se exponen los coeficientes de uniformidad (CU) para cada uno de los *greens* estudiados así como la calificación de estos según la escala expuesta en la Tabla 2. La media del CU de todos los *greens* del campo es de 62,8% lo que indica una pobre uniformidad general. Tan sólo hay un *green* (nº4) que puede ser calificada su uniformidad como excelente, siendo calificada la uniformidad de casi la mitad de los *greens* como pobre. El *green* nº4, es precisamente uno de los 2 *greens* que presenta un mayor número de aspersores que lo riegan, 6 frente a 4 en muchos de ellos (Tabla 1). Este hecho, unido al bajo ratio superficie de *green*/aspersores, hace pensar que para alcanzar una buena uniformidad de riego cuantos más aspersores y menos superficie de *green* mejor. El

otro *green* que presenta 6 aspersores es el nº6, pero tiene el inconveniente de su gran superficie (567 m<sup>2</sup>) lo que le afecta a su uniformidad (73,6%, Justa). De hecho, hay una relación lineal mucho más ajustada entre la uniformidad de riego y el ratio superficie/aspersores ( $R^2= 0,786$ ) que entre la uniformidad y el nº de aspersores ( $R^2= 0,158$ ) o la uniformidad y la superficie del *green* ( $R^2= 0,008$ ).

**Tabla 3.** Precipitación y uniformidad de riego en los 11 *greens*.

Green número	Precipitación (l/m <sup>2</sup> )				Uniformidad	
	Media	Desviación	Máxima	Mínima	CU(%)	Calificación
1	4,2	0,95	6,6	2,6	61,6	Pobre
2	5,2	0,99	7,2	3,3	75,5	Bueno
3	4,4	1,73	7,4	2,3	55,8	Pobre
4	4,5	0,63	6,5	3,7	85,7	Excelente
5	2,8	1,19	6,1	1,2	48,2	Pobre
6	3,6	1,02	6,7	1,9	73,6	Justo
7	4,1	0,74	5,0	1,9	75,5	Bueno
8	4,2	0,89	6,4	2,8	75,1	Bueno
9	3,7	1,57	7,1	1,6	52,5	Pobre
Out 1	2,7	0,77	4,2	1,2	64,3	Pobre
Out 2	3,4	0,56	4,7	2,4	79,6	Bueno

Otro factor que puede hacer variar la uniformidad de riego en este campo de golf es la forma del *green*. En la Tabla 1 se clasifican los *greens* en circulares, ovalados y rectangulares. Según observaciones del greenkeeper del campo, cuanto más rectangular es un *green*, más uniformidad de riego hay y cuanto más circular menos uniformidad tiene. Este hecho no se cumple, pues un *green* rectangular como es el nº5 tiene una uniformidad muy baja. Ahora bien este *green* nº5 junto al nº9 presenta tuberías porta aspersores de 50 mm frente a los demás que las tiene de 63 mm. Precisamente la uniformidad de estos 2 *greens* son las más bajas. Finalmente hay que indicar que la edad de los aspersores no parece estar afectando pues los *greens* con aspersores más recientes (nº 1, 2, 3 y 7) no son precisamente los que tienen mejores uniformidades de riego.

#### 4.- Conclusiones y recomendaciones

Se concluye que en este campo de golf la uniformidad de riego es baja, con la consecuencia inmediata de que hay que realizar riegos de apoyo a mano en zonas con menor precipitación. La baja uniformidad de riego observada está directamente relacionada con el ratio superficie del *green*/nº de aspersores y posiblemente por el diámetro de las tuberías porta aspersores.

Se recomienda, en este caso particular, el cambio de tuberías de los *greens* nº 5 y 9 de 50 a 63 mm, instalar 1 ó 2 aspersores más en los *greens* 3, 6 y 7, pero primero analizar de nuevo la uniformidad de riego.

#### 5.- Agradecimientos

Nuestro más sincero agradecimiento tanto al Real Club de Golf Manises como a su greenkeeper, José Manuel Iserte, por todas las facilidades concedidas para la realización de esta investigación.



## 6.- Bibliografía

- Baum, M.C., Dukes, M.D. & Miller, G.L. (2005). Analysis of Residential Irrigation Distribution Uniformity. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131, 336-341.
- Carrow, R.N., Duncan, R.R. & Huck, M.H. (2009). *Turfgrass and Landscape Irrigation Water Quality: Assessment and Management*. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Dernoeden, P.H. (2002). *Creeping Bentgrass Management*. John Wiley & Sons. Hoboken, NJ.
- Kjelgren, R., Rupp, L. & Kilgren, D. (2000). Water Conservation in Urban Landscapes. *HortScience*, 35, 1037-1040.
- Latif, M. & Ahmad, F. (2008). Operational Analysis of Water Application of a Sprinkler Irrigation System Installed in a Golf Course: Case study. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 134, 446-453.
- Llorens, J. (2009). Guía para determinar la uniformidad de riego en el green de un campo de golf. *Greenkeepers*, 32, 42-46.
- Vargas, J.M. & Turgeon, A.J. (2004). *Poa annua*. John Wiley & Sons. Hoboken, NJ.
- Zoldoske, D.F. (2003). *Improving Golf Course Uniformity: A California Case Study*. CATI Publication N°: 030901. Center for Irrigation Technology, Fresno, CA.



## PROYECTO FIGARO: PLATAFORMA PARA LA GESTIÓN INTEGRAL Y EFICIENTE DEL RIEGO

*Martínez Gimeno, M.A. (1) (P), Martínez Alzamora, F. (2), Jiménez-Bello, M.A. (3), Royuela. A. (4), Manzano, J. (5), Intrigliolo, D.S.(6)*

<sup>1</sup>Becaria Formación Profesorado Universitario. Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Campus Universitario de Espinardo 30100, Espinardo, Murcia [magimeno@cebas.csic.es](mailto:magimeno@cebas.csic.es)

<sup>2</sup>Catedrático de la Universitat Politècnica de València, Instituto Universitario de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Camino de Vera, s/n 46022 Valencia. [fmartine@hma.upv.es](mailto:fmartine@hma.upv.es)

<sup>3</sup>Investigador Contratado de la Universitat Politècnica de València, Instituto Universitario de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Camino de Vera, s/n 46022 Valencia. [mijibar@dihma.upv.es](mailto:mijibar@dihma.upv.es)

<sup>4</sup>Profesor Titular de la Universitat Politècnica de València, Centro Valenciano de Estudios sobre el Riego, Departamento Ingeniería Rural y Agroalimentaria, Camino de Vera, s/n 46022 Valencia. [aroyuela@agf.upv.es](mailto:aroyuela@agf.upv.es)

<sup>5</sup>Profesor Contratado Doctor de la Universitat Politècnica de València, Centro Valenciano de Estudios sobre el Riego, Departamento Ingeniería Rural y Agroalimentaria, Camino de Vera, s/n 46022 Valencia. [juamanju@agf.upv.es](mailto:juamanju@agf.upv.es)

<sup>6</sup>Científico Titular. Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Campus Universitario de Espinardo 30100, Espinardo, Murcia [dintri@cebas.csic.es](mailto:dintri@cebas.csic.es)

### Resumen

El consumo de agua y energía en el ámbito del riego en parcela es una cuestión de amplio interés y consecuencias para el medio ambiente y la economía. La solución a este doble reto exige la implantación del denominado “riego de precisión”. En el presente trabajo se presenta la plataforma informática en desarrollo FIGARO (Flexible and Precise Irrigation Platform to Improve Farm Scale Water Productivity), la cual forma parte de un proyecto financiado por la Unión Europea dentro del 7º Programa Marco, en el ámbito “Precision technologies to improve irrigation management and increase water productivity in major water-demanding crops in Europe” (KBBE.2012.1.1-03). El objetivo principal es desarrollar una herramienta de soporte a la toma de decisiones, que permita a los agricultores realizar programaciones de riego dirigidas a reducir el uso de agua, energía y fertilizantes, a la vez que se maximiza la productividad de las cosechas. La puesta en marcha y validación de la plataforma FIGARO se está llevando a cabo en diferentes países, con cultivos y condiciones climáticas diversas. Los primeros resultados de la campaña de 2014 en cultivos de cítrico y vid, sugieren incrementos de la productividad del agua con ahorros próximos al 30% de agua y del 36% de energía a nivel de comunidad de regantes.



## Abstract

Water and energy consumptions at plot level irrigation are issues of broad interest with an important environmental and economic impact. The solution to this double challenge requires the implementation of “precise irrigation”. In this work is shown the under developing software system FIGARO (Flexible and Precise Irrigation Platform to Improve Farm Scale Water Productivity), which is part of a project co-funded by the European Commission under the 7<sup>th</sup> Framework Programme, in the scope of “Precision technologies to improve irrigation management and increase water productivity in major water-demanding crops in Europe” (KBBE.2012.1.1-03). The aim is to develop a tool to support decision-making for end users that let them perform irrigation scheduling with the aim of reducing water, energy and fertilizers consumptions, as well as yield crop is maximized. Implementation and validation of the FIGARO platform is being performed in several countries with different crops and weather conditions. First results in the year 2014, in citrus and grapevine crops, suggest increases in water productivity with savings close to 30% of water and 36% of energy at Water User Association level.

## 1- Introducción. Objetivo del trabajo

El incremento de la demanda de agua, causada por el crecimiento de la población mundial, junto con el calentamiento global que agrava las condiciones de sequía, ha producido la disminución de los recursos hídricos. Maximizar la eficiencia del uso del agua en el ámbito del riego en parcela, responsable del 70% - 80% del consumo total de agua en climas semiáridos como el de España, es la base para la sostenibilidad ambiental. Adicionalmente, en la mayor parte de los sistemas de riego no se dispone de cota suficiente para realizar la distribución del agua por gravedad, por lo que es necesario el empleo de grupos de bombeo que aporten al sistema la presión necesaria para su correcto funcionamiento. En estos casos, el riego no sólo supone consumo de agua, sino que implica un importante consumo energético con graves consecuencias económicas y medioambientales. La solución a este doble reto exige la implantación del denominado “riego de precisión”, como herramienta de gran potencial para minimizar el consumo de recursos. En el presente trabajo se presenta la plataforma informática FIGARO (Flexible and Precise Irrigation Platform to Improve Farm Scale Water Productivity), en cuyo desarrollo participan 17 socios de 8 países (Israel, Reino Unido, Dinamarca, Holanda, Portugal, Italia, Grecia y España). El objetivo principal es crear una herramienta de soporte a la toma de decisiones, que permita a los agricultores realizar programaciones de riego dirigidas a reducir el uso de agua, energía y fertilizantes, a la vez que se maximiza la productividad de las cosechas. La plataforma, actualmente, se encuentra en su fase final de desarrollo e implementación en campo.

## 2- Bases de la plataforma para la gestión del riego

La plataforma FIGARO está compuesta por un conjunto de subsistemas que recogen datos ambientales y de los cultivos, entre otros. Con ellos se alimentan una serie de módulos que configuran el sistema de soporte a la toma de decisiones (DSS), el cual proporciona recomendaciones fiables a los usuarios sobre cuánto y cuándo deben regar para optimizar los recursos. El sistema es modular y flexible, por lo que podría actualizarse a lo largo del tiempo con la implementación de nuevas tecnologías y nuevos modelos agronómicos. Los usuarios (agricultores, comunidades de regantes, técnicos...) podrán



personalizar el sistema para satisfacer sus necesidades individuales de una forma fácil y accesible.

En la Figura 1 queda representada la arquitectura del sistema. En el siguiente apartado se detallan cada uno de los datos, modelos y módulos que emplean para su funcionamiento.

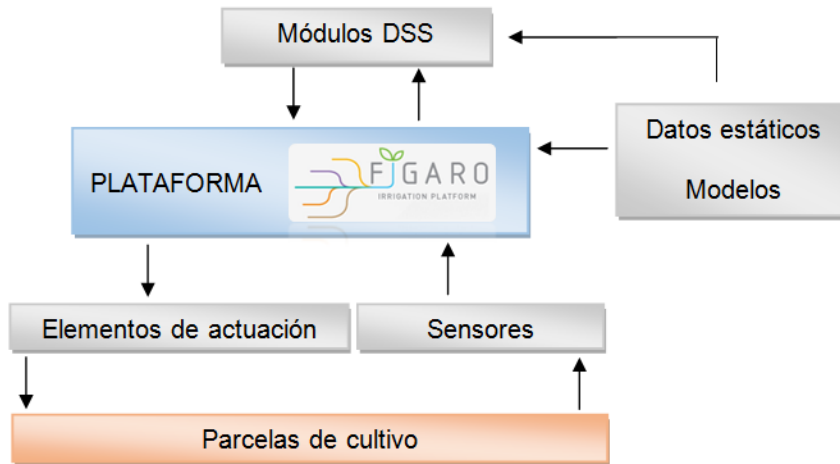
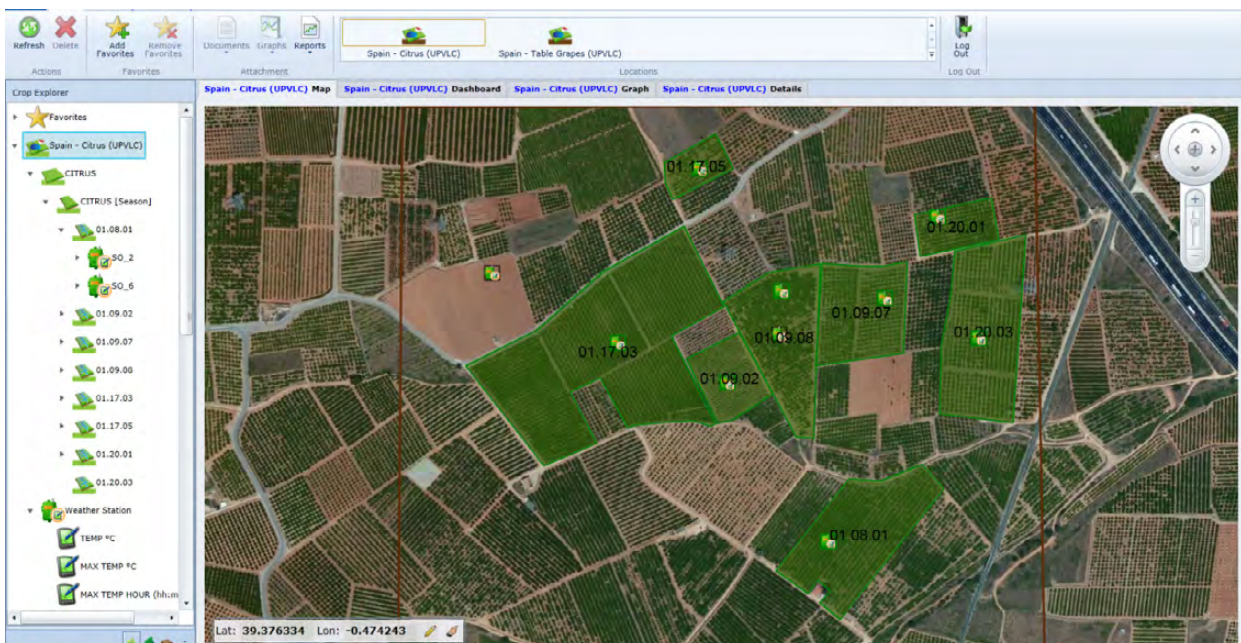


Figura 1. Arquitectura de la plataforma FIGARO

## 2.1- Estructura de la plataforma

La plataforma FIGARO basa su funcionamiento en el uso simultáneo de bases de datos y diversos modelos de optimización, integrados en servidores propios desarrollados en el proyecto. Concretamente, los datos estáticos, los datos dinámicos procedentes de los sensores y los elementos de actuación, son almacenados y mostrados al usuario a través de una interfaz gráfica denominada **uManage**. Ésta a su vez, alimenta a la plataforma **AquaSafe**, que integra los diferentes módulos dirigidos a optimizar la producción de los cultivos y el consumo de agua y energía. En la Figura 2 se puede ver, a modo de ejemplo, una de las pantallas del sistema uManage.



**Figura 2.** Vista del sistema uManage. Detalle visor y desglose de parcelas y sensores.

- Modelo de simulación del crecimiento de los cultivos

Son diversos los modelos empleados en la plataforma para la simulación y seguimiento de las producciones en base a las recomendaciones de riego y fertilización. Cada uno de los integrantes del consorcio que forma FIGARO emplea el modelo que más se ajusta a las características de los cultivos y climatología. Los principales modelos utilizados por ahora son: *Daisy* (Heidmann et al., 2008) para cultivo de patata, *Mohid-Land* (Galvão et al, 2004 y Chambel-Leitão et al, 2011) para maíz, y *Aquacrop* (Land and Water Division of FAO) para cultivos herbáceos en general. A diferencia de los socios del proyecto que trabajan con cultivos herbáceos (tomate, patata, maíz y algodón), la parte que se desarrolla en España, se centra cultivos leñosos. Concretamente se trabaja con cítricos y vid, no quedando éstos recogidos en ninguno de los modelos anteriores. Por ello, la metodología empleada para la optimización de recursos para los cultivos leñosos se ha adaptado en base a sus características intrínsecas. Los dos grandes ejes que permiten calcular los recursos a emplear y realizar seguimientos de la evolución de los cultivos son los siguientes:

*Modelos para la optimización de la programación del riego.*

Las necesidades de riego para los cultivos leñosos, tanto de los cítricos como de la vid, se basan en las recomendaciones que el Servicio de Tecnología del Riego del Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA) proporciona semanalmente mediante su servicio web. Estas recomendaciones proporcionan valores que se ajustan a las características de los cultivos y a sus condiciones climáticas. Concretamente el cálculo relativo a las necesidades de riego en cítricos se basa en un estudio llevado a cabo por Ginestar y Castel (1996), el cual define la reducción relativa del rendimiento en relación con la evapotranspiración de cultivo en Clementina de Nules para clima mediterráneo. De la misma forma, el modelo de cálculo de las necesidades en vid se basa en estudios que determinan el coeficiente de cultivo para uva (Williams y Ayars, 2004; y López-Urrea et al 2006). Adicionalmente para optimizar el riego, al tiempo que se minimizan las posibles mermas en la producción a nivel de cada parcela, estas recomendaciones se ajustan considerando los valores semanales del potencial de tallo medidos con cámara de presión, el contenido de agua del suelo medido mediante sondas humedad multisensor, y la previsión meteorológica.

*Integración de la información suministrada mediante teledetección.*

Los modelos de estimación de necesidades de riego anteriores necesitan ciertos parámetros, como la cubierta vegetal, para su implementación y seguimiento. Mediante el procesamiento de ortofotos e imágenes de satélite de alta resolución (RapidEye) se puede obtener este parámetro para cada una de las parcelas objeto de estudio. Del mismo modo, se generan mapas de evapotranspiración real aplicando métodos de balance de energía en superficie (SEBAL, Bastiaanssen et al. 1998a, Bastiaanssen et al. 1998b). Para este fin se utilizan las imágenes proporcionadas por Landsat 8 con una frecuencia temporal de 16 días. Esta información también es utilizada para estimar las cantidades teóricas de riego y compararlas con los registros de los contadores con el fin de evaluar la gestión mediante la producción de mapas de indicadores de gestión.

- Modelos de simulación del comportamiento de la red hidráulica

Las características específicas de las zonas de cultivo mediterráneas, normalmente asociadas en Comunidades de Regantes para el suministro del agua de riego a través de redes colectivas, requieren un especial tratamiento de las programaciones para optimizar el

uso conjunto de los recursos. Para ello se utilizan modelos matemáticos de las redes, que simulan el comportamiento hidráulico de éstas, con el fin de asegurar el suministro bajo las condiciones de garantía requeridas. El modelo hidráulico está preparado para mantenerse calibrado mediante los datos proporcionados por los sistemas SCADA, los cuales se alimentan de sensores como caudalímetros, contadores, transductores de presión y analizadores de energía. Con la implementación de estrategias de optimización de los turnos de riego (Jiménez-Bello et al. 2010, Jiménez-Bello et al 2015) se consigue aportar a los cultivos el agua previamente estimada, con el mínimo consumo energético.

## 2.2 - Puesta en marcha y validación de la plataforma.

La puesta en marcha y validación de la plataforma FIGARO se está llevado a cabo simultáneamente en diferentes países, con cultivos y condiciones climáticas diversas. Como se ha comentado anteriormente, los casos de estudio del equipo español, y que se presentan en esta comunicación, se centran en dos cultivos leñosos. Por un lado, se dispone de parcelas de cítricos ubicadas en el sector XI de la Comunidad de Regantes de Picassent y por otro, una parcela experimental de vid localizada en Cheste, ambas en la provincia de Valencia. La organización y diversidad de las parcelas de cítricos gestionadas conjuntamente con la Comunidad de Regantes, ha permitido realizar diferentes programaciones para comparar la eficiencia de la plataforma FIGARO en condiciones reales. El caso concreto de la parcela de vid, está aportando información de los diferentes tratamientos (cuatro variantes que incluyen riego deficitario) a nivel de parcela, bajo condiciones de tratamiento muy controladas. Ambas zonas de estudio se complementan para mostrar la disparidad en el uso de los recursos en función del nivel de organización del sistema agrícola. Durante los años 2013 y 2014 se ha llevado a cabo la instalación y puesta en marcha de los equipos, así como el desarrollo de las programaciones de riego en base a las directrices planteadas en el proyecto.



**Figura 3.** Izquierda, parcelas de cítricos, Picassent (Valencia) 39°22'46.36"N, 0°28'19.92"O.  
Derecha, parcela de vid, Cheste (Valencia) 39°33'28.7"N, 0°42'22.6"O.

Así mismo, se ha monitorizado el funcionamiento de la red hidráulica de la Comunidad de Regantes de Picassent mediante la adquisición en tiempo real de los datos





relativos a consumos eléctricos, velocidades de giro de los grupos de bombeo, niveles de balsas, caudales suministrados, presiones en puntos estratégicos, consumos de las tomas en parcela y la programación de riego llevada a cabo. Ello está permitiendo mantener el modelo hidráulico calibrado de manera continua, con el fin de realizar la programación de los turnos de riego en base a estrategias de optimización que garanticen un consumo energético mínimo, a la vez que se aporta el agua necesaria determinada por los modelos agronómicos a través de la plataforma.

A pesar de haber sufrido un año con una demanda evaporativa muy alta, los primeros resultados de la campaña de 2014, sugieren el incremento de la productividad del agua en las dos zonas de estudio empleando las directrices desarrolladas por la plataforma FIGARO. En el caso de los cítricos, se han alcanzado ahorros del 30% en agua, sin mermas en la producción, y ahorros del 36% de energía a nivel de comunidad de regantes. En la parcela piloto de vid, se ha conseguido notables ahorros de agua, de alrededor del 40%, mediante la aplicación de técnicas de riego deficitario.

### **3- Resultados y conclusiones**

Con el fin de dar respuesta a los retos medioambientales y económicos que hoy día son incuestionables en el ámbito de la agricultura, la plataforma FIGARO se convertirá en una herramienta completa para el riego de precisión integrado. A través del uso de sensores que controlan el continuo suelo - planta - atmósfera, de las herramientas de previsión meteorológica, de los sistemas de información geográfica, junto con la teledetección y otros sistemas de control, el sistema presentará a los usuarios un protocolo óptimo de riego aplicable tanto a nivel de parcela como a nivel de comunidad de regantes.

### **4- Agradecimientos**

Este trabajo ha sido financiado por Unión Europea dentro del 7º Programa Marco, en el ámbito "Precision technologies to improve irrigation management and increase water productivity in major water-demanding crops in Europe" (KBBE.2012.1.1-03).

### **5- Bibliografía**

- Bastiaanssen, W. G. M., Menenti, M., Feddes, R. A. & Holstlag, A. A. M. (1998a). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). Part 1. Formulation. *J. Hydrol.* 212–213, 198–212.
- Bastiaanssen, W. G. M., Pelgrum, H., Wang, J., Ma, Y., Moreno, J., Roerink, G. J. & van der Wal, T. (1998b) The surface energy balance algorithm for land (SEBAL): Part 2. Validation. *J. Hydrol.* 212–213, 213–229.
- Chambel-Leitão, P., Almeida, C., Jauch, E., Trancoso, R., Neves, R., & Leitão, J. C. (2011). Evapotranspiration forecast using SWAT model and weather forecast model. SWAT International conference. Toledo. España.
- Galvão, P. B., Neves, R., Silva, A., Leitão, P. C., & Braunchweig, F. (2004). Integrated watershed modeling. European Space Agency ESA SP, 549, 187-190.



- Ginestar, C. & Castel, J.R. (1996). Response of young 'Clementine' citrus trees to water stress during different phenological periods. *J. Hort. Sci.*, 71, 551–559.
- Heidmann, T., Tofteng, C., Abrahamsen, P., Plauborg, F., Hansen, S., Battilani, A., & Vacek, J. (2008). Calibration procedure for a potato crop growth model using information from across Europe. *Ecological modelling*, 211(1), 209-223.
- Jiménez-Bello M.A, Martínez Alzamora, F., Bou Soler, V. & Bartoli Ayala, H.J. (2010). Methodology for grouping intakes of pressurised irrigation networks into sectors to minimise energy consumption, *Biosystems Engineering* 105 (2010), pp. 429–438.
- Jiménez-Bello M.A., Royuela A., Manzano J., García Prats A. & Martínez Alzamora, F. (2015). Methodology to improve water and energy use by proper irrigation scheduling in pressurised networks. *Agricultural Water Management* 149, 91-101.
- López-Urrea, R., Montoro, A., Mañas, F., López-Fuster, P., & Fereres, E. (2012). Evapotranspiration and crop coefficients from lysimeter measurements of mature 'Tempranillo' wine grapes. *Agricultural Water Management*, 112, 13-20.
- Williams, L. E. & Ayars, J. E. (2005). Water use of Thompson Seedless grapevines as affected by the application of gibberellic acid (GA 3) and trunk girdling—practices to increase berry size. *Agricultural and Forest Meteorology*, 129(1), 85-94.

## INFLUENCIA DE LAS PROGRAMACIONES DE RIEGO EN PARCELA SOBRE EL FUNCIONAMIENTO DE UNA RED COLECTIVA DE RIEGO

*Lima, F.A.<sup>1</sup>, Córcoles, J.I.<sup>2</sup>, Romero, A.M.<sup>3</sup>, Tarjuelo, J.M.<sup>4</sup>*

<sup>1</sup> Doctorando, Universidad Castilla-La Mancha (UCLM), Centro Regional de Estudios del Agua, [aldiel\\_metal@hotmail.com](mailto:aldiel_metal@hotmail.com)

<sup>2</sup> Dr. Ingeniero Agrónomo, Profesor Ayudante Doctor EIIAB, Departamento de Mecánica Aplicada e Ingeniería de Proyectos, UCLM, [juanignacio.corcoles@uclm.es](mailto:juanignacio.corcoles@uclm.es)

<sup>3</sup> Dr. Ingeniero Agrónomo, Profesor Asociado; EIIAB, Departamento de Mecánica Aplicada e Ingeniería de Proyectos, UCLM, [angel.mromero@uclm.es](mailto:angel.mromero@uclm.es)

<sup>4</sup> Dr. Ingeniero Agrónomo. Catedrático de UCLM. Centro Regional de Estudios del Agua. Albacete. [jose.tarjuelo@uclm.es](mailto:jose.tarjuelo@uclm.es)

### Resumen

En zonas regables con redes de distribución de agua, es necesario el desarrollo de herramientas de ayuda para mejorar la eficiencia en el uso del agua y la energía, sin comprometer el rendimiento y productividad de los cultivos. En este trabajo se realiza un análisis del comportamiento de una red de distribución de riego, con distintas estrategias de la programación del riego en parcela, aplicado a un día de máximas necesidades hídricas de los cultivos. La metodología propuesta ha sido aplicada en la zona regable de Tarazona de La Mancha (Albacete, España). Para ello, se establece una programación de riego en diversas parcelas de la zona regable, a partir del año meteorológico típico (TMY). Para evaluar el comportamiento de la red, se han determinado los costes energéticos y consumo de energía en función de los distintos escenarios de apertura de tomas en parcela planteados. Para simular el comportamiento hidráulico de la red, se ha utilizado EPANET®, en combinación con MATLAB®.

### Abstract

In irrigated areas with pressurized irrigation networks, it is necessary to develop tools with the aim of improving efficient use of water and energy resources, maintaining crop yield and productivity. In this paper, the performance of the irrigation network is analyzed, considering several scenarios of on-farm irrigation scheduling for a day with the highest crop water requirements (July). The proposed methodology has been applied to the irrigation area of Tarazona de La Mancha (Albacete). For this aim, an irrigation scheduling was used for each plot of the irrigated area, based on the typical meteorological year (TMY) methodology. To analyze irrigation network performance, energy consumed and energy costs were computed at each scenario of opening of hydrants. To compute hydraulic variables, EPANET® toolkit was used in combination with MATLAB®.

### 1) Introducción. Objetivo del trabajo.

En regiones semiáridas como Castilla-La Mancha, donde el régimen pluviométrico es irregular en su distribución temporal y espacial, el regadío llega a ser una actividad necesaria para mantener la rentabilidad de muchas explotaciones. Sin embargo, un manejo incorrecto de los sistemas de riego conlleva repercusiones negativas, tanto económicas como medioambientales.



Este aspecto adquiere gran relevancia en el caso de redes colectivas de riego, donde es imprescindible mejorar la eficiencia del uso del agua y de la energía como actividad encaminada a garantizar la sostenibilidad del regadío. Esto puede conseguirse implementando estrategias de mejora en la gestión de los recursos hídricos y energéticos en las zonas regables.

Para la gestión de este tipo de zonas, se plantean distintas alternativas de manejo, tales como el riego por turnos o a la demanda. Numerosas herramientas se han desarrollado para la mejora en el manejo de redes colectivas de riego, todas ellas centradas en la reducción del consumo energético de este tipo de instalaciones, entre las que destacan las herramientas para la sectorización de redes (*Carrillo-Cobo et al., 2011; Fernández-García et al., 2014*) y la determinación de puntos críticos de la red (*González Perea et al. 2014*).

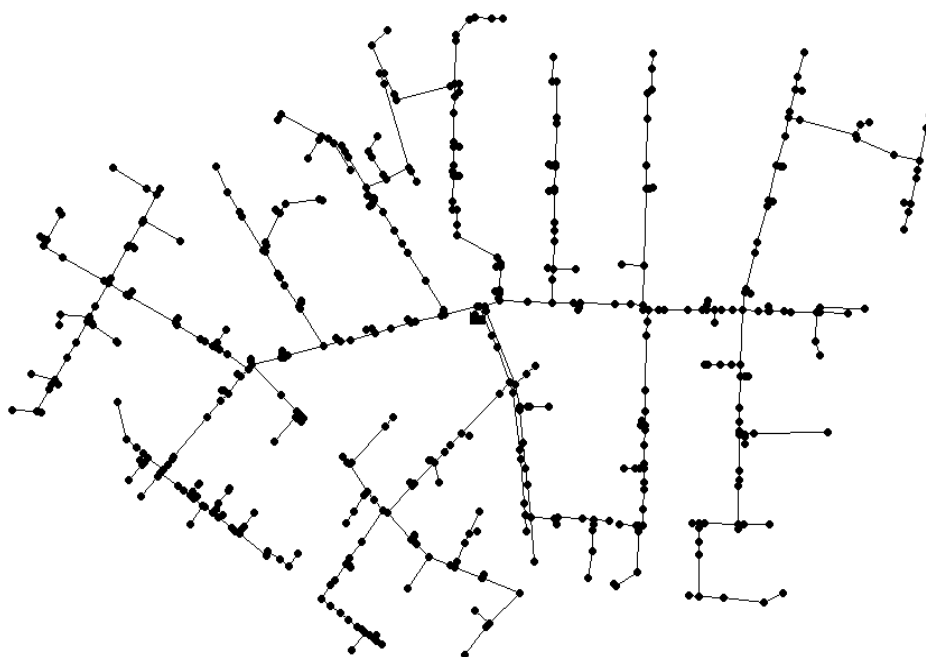
En el manejo de redes colectivas, los propios agricultores planifican la programación del riego en parcela de forma individual para cada uno de sus cultivos. Por ello, la mejora de la gestión de las redes colectivas de riego, requiere, en la medida de lo posible, la participación de los técnicos responsables de la misma en la programación del riego en parcela, para tratar de optimizar el funcionamiento de la red. Resulta pues imprescindible disponer de un modelo hidráulico de la red y del conjunto de herramientas necesarias para armonizar el manejo del riego en parcela con el funcionamiento de la propia red, que conduzca al mínimo coste total del agua aplicada con el riego.

El objetivo del trabajo es desarrollar una herramienta de ayuda a toma de decisiones, para, partiendo del modelo hidráulico calibrado de una red, analizar su comportamiento utilizando distintas estrategias de programación del riego en parcela.

## **2) Material y métodos**

### **2.1 Caso de estudio**

La metodología propuesta ha sido aplicada en una red de riego a la demanda, perteneciente a la zona regable de Tarazona de La Mancha (Albacete, España) (Fig. 1). La red abastece al sector de estudio, con una superficie regable de 550 ha, donde predomina el sistema de riego por aspersión en cultivos herbáceos y hortícolas. Entre los cultivos más representativos de la zona, con un 50% de la superficie regable, destacan la cebolla y el maíz. Se trata de una zona que se abastece de recursos hídricos subterráneos, con tres sondeos y un embalse de regulación. La estación de re-bombeo (que conecta el embalse con la red) está compuesta por 10 bombas iguales conectadas en paralelo (140 CV para cada bomba) donde una de ellas está dotada con un variador de velocidad.



**Figura 1.** Red de riego de Tarazona de La Mancha

## 2.2 Metodología propuesta

Para realizar un plan de riegos anual de los cultivos de la zona, se ha partido de la distribución correspondiente a la campaña 2015, con los datos climáticos de un año meteorológico típico (TMY) (Domínguez, et al., 2013) constituido a partir de los datos climáticos de la serie 2000-2014 de una estación de la red del Servicio de información Agroclimática para el Regadío (SIAR) próxima a la zona (MAGRAMA, 2015).

En la Tabla 1 se recogen los datos climáticos del TMY utilizados para establecer la programación de riegos.

**Tabla 1.** Característica del Año Típico Meteorológico (TMY)

Mes	Año	Precipitación acumulada (mm)	Evapotranspiración de referencia (ET <sub>o</sub> ) acumulada (mm)
Enero	2002	24,8	33,7
Febrero	2012	3,2	60,9
Marzo	2005	9,0	94,1
Abril	2005	30,9	132,6
Mayo	2010	39,4	132,3
Junio	2011	13,2	184,9
Julio	2009	1,4	238,4
Agosto	2009	0,0	198,1
Septiembre	2013	3,3	122,5
Octubre	2013	34,9	78,3
Noviembre	2006	39,4	65,1
Diciembre	2011	6,0	32,4

Una vez conocida la planificación de riegos, se tomó como referencia el día 17 de julio (un día en el período de máximas necesidades hídricas de los cultivos) para realizar las simulaciones de caudales circulantes por la red. Para simplificar, se tuvieron en cuenta sólo

las parcelas de maíz y cebolla y se consideró un único sector de riego por parcela, estableciendo entonces los escenarios de apertura y cierre de hidrantes. Los volúmenes a aplicar y los tiempos de apertura para cada hidrante durante el día indicado se calcularon a partir de la planificación de riegos establecida, realizando un balance de agua diario en el suelo usando el módulo destinado para este fin en el programa MOPECO (Modelo de Optimización Económica del Riego) (Domínguez, et al., 2012ab) que aplica la metodología FAO (Allen et al., 1998). Los datos incluidos al programa se recogen en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Parámetros utilizados para realizar el balance de agua en el suelo en cebolla y maíz.

Datos de cultivo					
		Cebolla		Maíz	
		Duración (días)	Coefficientes de cultivo Kc	Duración (días)	Coefficientes de cultivo Kc
Etapa fenológica	Establecimiento	60	0,65-0,65	41	0,30-0,30
	Desarrollo vegetativo	31	0,65-1,20	39	0,30-1,10
	Etapa media	47	1,20-1,20	38	1,10-1,10
	Maduración	19	1,20-0,75	27	1,10-0,55
Fecha de siembra		23/03		28/04	
Profundidad Radicular máxima (cm)		40		40	
Objetivo productivo		100%		100%	
Datos del suelo					
		Cebolla		Maíz	
Profundidad máxima del suelo (cm)		40		40	
Textura del suelo		Franco arenoso		Franco limoso	
Intervalo de humedad inicial		80%		80%	
Datos del sistema de riego y manejo					
		Cebolla		Maíz	
Sistema de riego		Aspersión-Cobertura		Aspersión-Cobertura	
Pérdidas por evaporación y arrastre		9%		9%	
Coeficiente de uniformidad		88%		88%	
Máximo y mínimo volumen en un riego (mm)		22,8 y 5,7		25,65 y 5,7	
Máximo y mínimo intervalo entre riegos (días)		3 y 1		5 y 2	
Otros datos					
Datos climáticos: Evapotranspiración de referencia (mm) y precipitación (mm)					

Como se ha indicado, a partir de los datos obtenidos de la programación de riegos, se ha determinado el tiempo de apertura de cada hidrante. Para establecer la hora de apertura, se han planteado tres escenarios: a) El Escenario 1, que considera que todas las tomas están abiertas en el mismo momento, tomando como hora de inicio la misma en todas ellas; b) El Escenario 2, donde la mitad de las tomas se ponen en marcha a una misma hora (igual hora de inicio) mientras que para el resto, la hora de apertura se establece de modo aleatorio; c) Escenario 3, donde la hora del inicio del riego en todas las parcelas se establece de forma aleatoria. Estos escenarios se han planteado teniendo en cuenta aspectos de manejo característicos de la zona, tales como que, normalmente, justo en el comienzo del tramo tarifario más económico (P6) gran parte de las parcelas comienzan a

regar. El horario de riego se ha limitado al período de menor coste económico (P6), por lo que la red sólo estará en funcionamiento entre las 0:00 y las 8:00. Para analizar el comportamiento hidráulico de la red en función del tiempo, se han considerado períodos de cálculo cada 15 minutos y el coste energético de las tarifas contratadas por la sociedad (Tabla 3).

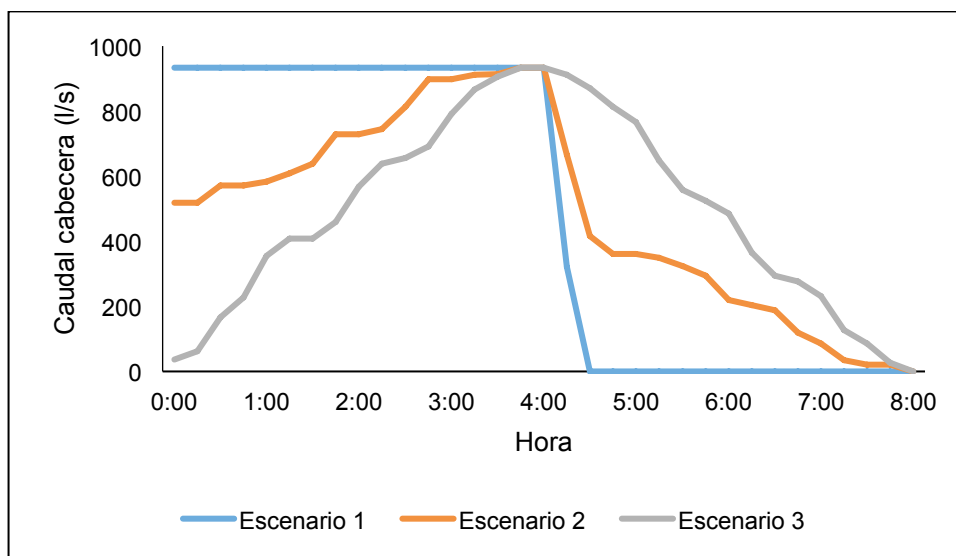
**Tabla 3.** Tarifas y precios de coste de energía para el mes de julio.

Mes	Horario		Tarifa	Coste (€/kW h)
	Inicial	Final		
Julio	0:00	8:00	P6	0,053428
	8:00	10:00	P4	0,080755
	10:00	14:00	P3	0,087611
	14:00	18:00	P4	0,080755
	18:00	22:00	P3	0,087611
	22:00	0:00	P4	0,080755

La evaluación del comportamiento de la red para los distintos escenarios se apoyó en el modelo calibrado de la misma, realizado en trabajos previos (*Moreno et al, 2007*) y el motor de cálculo EPANET® (*Rossmann, 2001*), en combinación con otras herramientas desarrolladas en MATLAB®. Para cada escenario se caracterizó el punto de funcionamiento del grupo de bombeo (caudal y presión), el rendimiento medio de la estación de bombeo, así como el consumo energético y su coste. Para determinar el rendimiento medio del grupo de bombeo, se utilizó el Modelo de Análisis de Eficiencia Energética en Estaciones de Bombeo (MAEEB) (*Moreno et al, 2007*).

### 3) Resultados y discusión

Con respecto a los caudales requeridos en cabecera, como es obvio, el volumen acumulado fue el mismo para los distintos escenarios. Por otra parte, la distribución de los caudales es distinta (Fig. 2), ya que tanto la hora de apertura, como número de tomas abiertas simultáneamente, cambió.

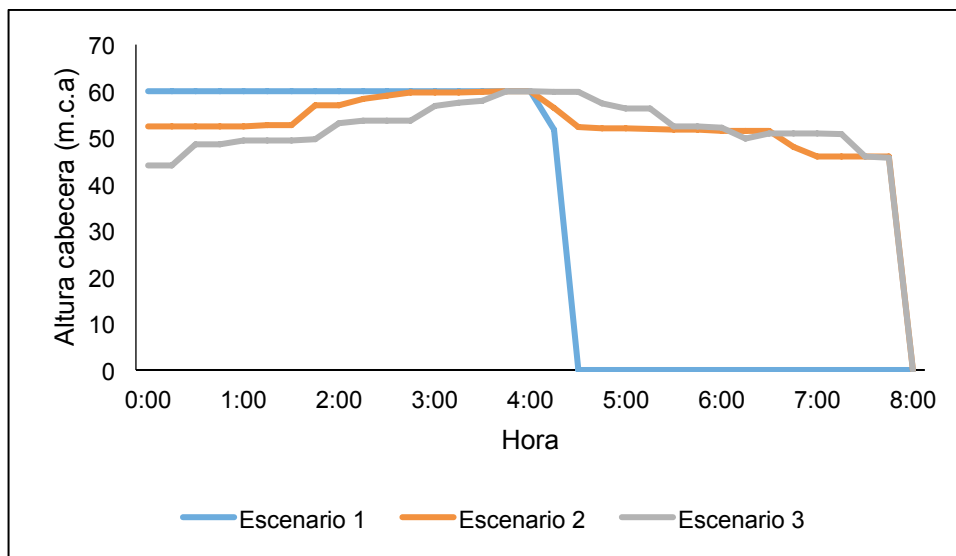


**Figura 2.** Caudal en cabecera para los distintos escenarios (período P6, desde las 0:00 hasta las 8:00).

En el Escenario 1, la distribución de caudales se concentra en las cuatro primeras horas de la tarifa P6 (de las 0:00 hasta las 4:00), ya que todas las tomas están abiertas al mismo tiempo, por lo que el caudal en cabecera toma un valor constante próximo a los 900 l/s.

Para el Escenario 2, la mayor demanda se produce en la primera parte del período (entre 00:00 a 4:00 horas), con un máximo cerca de las 4:00 h (de aproximadamente 900 l/s). Esto es debido a que la mitad de las tomas están abiertas durante las primeras cuatro horas, sumando los caudales derivados de la apertura aleatoria de tomas. Por el contrario, para el Escenario 3, en el que el horario de apertura de las tomas es aleatorio, la distribución de los caudales se asemeja a una distribución normal.

La altura de presión horaria demandada en cabecera se recoge en la Figura 3. La distribución horaria de las presiones es similar a la establecida para los caudales. Así, el Escenario 1 mantiene las presiones constantes con su máximo valor (aproximadamente 60 m.c.a.) durante las cuatro primeras horas del período, anulándose para el resto, mientras que en los escenarios 2 y 3 presenta variaciones de entre 40-60 m.c.a, con el valor máximo en la hora central del período.



**Figura 3.** Presión en cabecera para los distintos escenarios.

Durante el tiempo de funcionamiento del grupo de bombeo, el mayor valor de presión media de trabajo se da en el Escenario 1, con 60 m.c.a., con valores parecidos en los Escenarios 2 y 3, de 54 m.c.a. y de 53 m.c.a., respectivamente (Tabla 4).

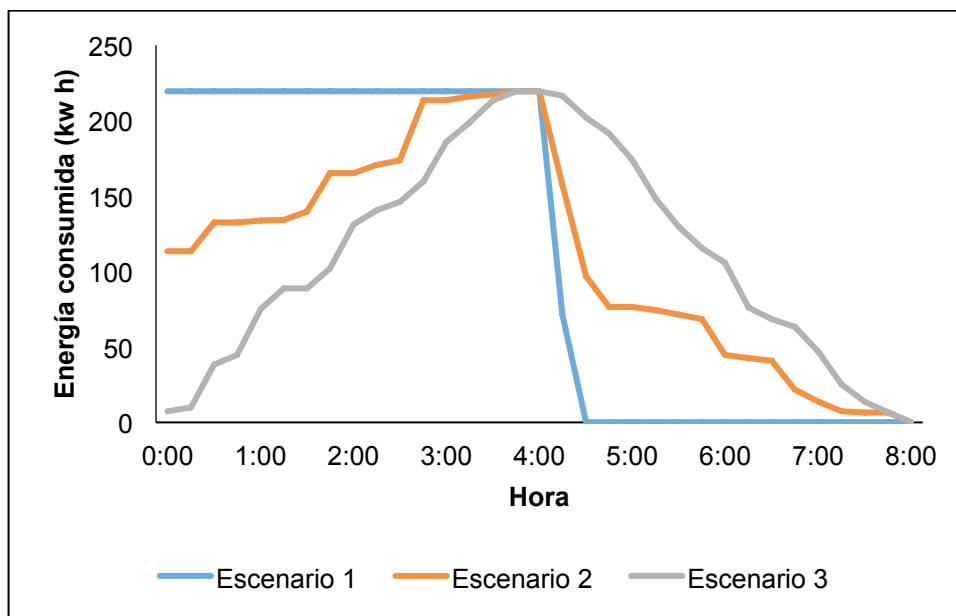
**Tabla 4.** Presión media en cabecera (m.c.a.) para los escenarios analizados

Escenario	Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
1	59.45	51.76	59.91	1.92
2	53.46	45.87	59.90	4.49
3	52.50	43.96	59.91	4.66

La eficiencia energética de la estación de bombeo, es similar en los tres casos analizados, con valores próximos al 60%, siendo ligeramente superior para el primer escenario (62,16 %). En este caso, el valor es constante, mientras que para los otros oscila

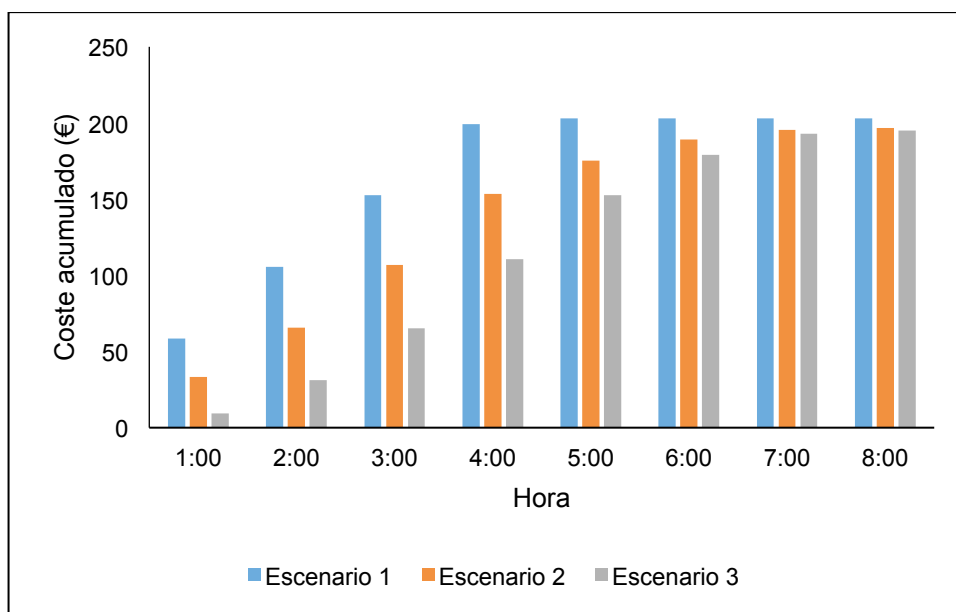
entre 35 % y 71 % para el Escenario 2 (valor medio del 58,41%), y entre el 40% y 71 % en el Escenario 3 (valor medio del 58,66%).

La evolución de la energía consumida por la estación de bombeo (Fig. 4) mostró una evolución similar a la obtenida con la distribución de caudales, donde el Escenario 1 presenta un consumo constante (211 KW h). Considerando el consumo total de energía, el Escenario 1 presenta un mayor consumo, siendo del 3 % y 4 % superior en comparación con el Escenario 2 y 3, respectivamente.



**Figura 4.** Consumo energético de la estación de bombeo, para los distintos escenarios.

La Figura 5, muestra los costes acumulados por hora para los distintos escenarios. Considerando el coste acumulado para el día de estudio, el Escenario 3 es el que mayor coste acumulado presenta (203 €). Con respecto a éste, en los Escenarios 2 y 3 se estiman ahorros del 3% (196 €) y el 4% (195 €).



**Figura 5.** Coste acumulado por hora para los distintos escenarios.



#### 4) Conclusiones y Recomendaciones

La optimización del manejo de una red colectiva de riego exige controlar y conocer tanto el comportamiento de la red, como la programación de riego en parcela. Así, es posible prever el funcionamiento de la red a partir de los requerimientos hídricos derivados de la programación de los riegos en parcela. La variación de la secuencia de apertura y cierre de los hidrantes no modifica el agua suministrada a los cultivos, pero permite establecer un escenario que minimice el coste energético en la estación de bombeo. Este aspecto está relacionado con el hecho de que distintos manejos de la red conllevan a distintos comportamientos de la misma desde el punto de vista energético.

Entre los escenarios planteados en este trabajo, la concentración del horario de apertura de los hidrantes (Escenario 1) conlleva un incremento del consumo energético de la red, disminuyendo cuando la apertura de las tomas se produce de modo aleatorio (Escenario 3).

La integración de la programación de riegos en el manejo conjunto de la red por un gestor permitirá disminuir los costes energéticos sin reducir los aportes de agua recibidos por los cultivos.

#### 5) Bibliografía

- Allen, R.G. Pereira, L.S. Raes, D. Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56, 297.
- Carrillo-Cobo, M, T., Rodríguez, J,A., Montesinos, P., López, R., Camacho, E., 2011, Low energy consumption seasonal calendar for sectoring operation in pressurized irrigation networks, *Irrig, Sci*, 29, 157–169.
- Domínguez, A, Juan, J,A, Tarjuelo, J,M, Martínez, R,S, Martínez-Romero, A, (2012a), Determination of optimal regulated deficit irrigation strategies for maize in a semi-arid environment, *Agricultural Water Management*, 110, 67–77.
- Domínguez, A, Jiménez, M, Tarjuelo, J,M, Juana, J,A, Martínez-Romero, A, Leite, K,N, (2012b), Simulation of onion crop behavior under optimized regulated deficit irrigation using MOPECO model in a semi-arid environment, *Agricultural Water Management*, 113, 64–75.
- Domínguez, A. Martínez-Romero, A. Leite, K.N. Tarjuelo, J.M. Juana, J.A. López-Urreac, R. 2013. Combination of typical meteorological year with regulated deficit irrigation to improve the profitability of garlic growing in central Spain. *Agricultural Water Management*, 130, 154–167.
- Fernández-García I, Moreno MA, Rodríguez-Díaz JA (2014a) Optimum pumping station management for irrigation networks sectoring: Case of Bembezar MI (Spain), *Agric Water Manage* 144:150-158.
- Gonzalez Perea, R., Camacho Poyato, E., Montesinos, P., Rodríguez-Díaz, J,A, 2014, Critical points: interactions between on-farm irrigation systems and water distribution network, *Irrig, Sci*, 32: 255-265.
- MAGRAMA, 2015, Red del Servicio de Información Agroclimática para el Regadío (SIAR), Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (<http://www.magrama.gob.es/>).
- Moreno, M, A., Pelayo, J., Córcoles, J, I., Planells, P., Carrión, P, A., Tarjuelo, J, M., 2007, Measurement and improvement of the energy efficiency at pumping stations. *Biosys, Engin*, 98:479-486.



XXXIII Congreso Nacional de Riegos  
Universitat Politècnica de València, Valencia 2015  
DOI:<http://dx.doi.org/10.4995/CNRiegos.2015.1458>

Rossman, L, A, (2001), EPANET 2, Users Manual, Water supply and Water Resources Division National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati, USA: U,S, Enviromental Protection Agency.



# COMPORTAMIENTO DE UNA SELECCIÓN DE EMISORES PARA FERTIRRIEGO DE CULTIVOS HORTÍCOLAS EN INVERNADERO CON AGUAS REGENERADAS

*Baeza Cano, R., Contreras París, J.I., Trujillo Delgado, J., Alonso López, F.*

Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera de Andalucía (IFAPA), Centro La Mojonera, Camino San Nicolás, nº1, 04745 La Mojonera, Almería.  
[rafaelj.baeza@juntadeandalucia.es](mailto:rafaelj.baeza@juntadeandalucia.es)

## Resumen

Las Aguas Residuales Urbanas Regeneradas (ARUR) se muestran como una fuente alternativa de agua para riego en áreas con recursos tradicionales deficitarios, tal es el caso de las zonas costeras de Andalucía. Estas aguas, en general, se caracterizan por presentar una peor calidad física y biológica que las tradicionales aguas subterráneas, con niveles relativamente altos de sólidos en suspensión y elevada presencia bacteriana. Como consecuencia de esto se incrementan los fenómenos de obturación de los emisores de riego. En pro de obtener información del tipo de emisores que mejor se adaptan a este tipo de agua, el IFAPA ha instalado un banco de ensayo en condiciones de campo, en el que, utilizando aguas regeneradas se seleccionaron, en un ensayo previo, 20 modelos de emisores que se han sometido a tres tratamientos: T1: riego con agua residual urbana regenerada; T2: fertirriego con agua residual urbana regenerada + equilibrio fertilizante estándar y T3: fertirriego con agua residual urbana regenerada + equilibrio fertilizante estándar + mantenimiento. Los resultados de la primera campaña de riego muestran una elevada uniformidad de distribución de caudal en todos los emisores seleccionados, si bien se aprecian diferencias significativas entre ellos. Se han detectado pequeños porcentajes de reducción de caudal en el 30% de los modelos de emisores. En esta primera campaña aún no se observan diferencias entre tratamientos.

## 1- Introducción y objetivos

Los cultivos hortícolas bajo invernadero desarrollados en el Sureste de España acaban de cumplir 50 años de trayectoria. A lo largo de esta media década de desarrollo se han producido numerosos cambios en el sistema. La mayor parte de ellos propiciados por la natural evolución de la tecnología. En ocasiones las evoluciones han sido necesarias adaptaciones a problemas surgidos. Tal es el caso de la disponibilidad de recursos hídricos que, tras la disminución de las reservas de aguas subterráneas o, el empeoramiento de su calidad, por fenómenos como la intrusión marina, ha obligado a la incorporación de nuevas fuentes de agua como las Residuales Urbanas Regeneradas (ARUR) o las procedentes de cursos fluviales. Estas aguas en general se caracterizan por presentar una buena calidad química, pero, sin embargo una peor calidad física y biológica que las tradicionales aguas subterráneas, con niveles relativamente altos de sólidos en suspensión y elevada presencia bacteriana. Como consecuencia de esto se han detectado problemas relacionados con el mantenimiento de las instalaciones de riego, las cuales pueden verse afectadas por la calidad específica de estos efluentes, especialmente en lo que se refiere a la obturación de emisores en los sistemas de riego localizado. Niveles de sólidos en suspensión superiores a  $78 \text{ mg L}^{-1}$  no permiten una uniformidad óptima en el riego (Capra et al. 2004).

Afortunadamente, las aguas regeneradas presentan valores en este parámetro muy inferiores. Estudios realizados durante varias campañas por el IFAPA en La Cañada (Almería) muestran valores medios en finca de  $8,33 \text{ mg L}^{-1}$ , con máximos que en ningún caso superan los  $10 \text{ mg L}^{-1}$  (Contreras, 2014). Sin embargo, los principales agentes obturadores no son exclusivamente los sólidos en suspensión, sino la aglomeración de éstos (partículas finas minerales u orgánicas) con subproductos microbianos y biomasa desarrollada en el interior de las tuberías y ramales (Ravina et al. 1992). Este aspecto (desarrollo de biomasa) hace que sea tanto o más importante un adecuado diseño y mantenimiento de la red de riego que la calidad del agua de partida. Estudios prospectivos previos desarrollados en campo demuestran que las instalaciones de riego en las fincas que utilizan estas aguas presentan habitualmente problemas de funcionamiento y uniformidad relacionados con frecuencia a obturaciones en los emisores (Baeza et al. 2010). En pro de obtener información del tipo de emisores que mejor se adaptan a las nuevas condiciones, el IFAPA, en colaboración con las empresas fabricantes e instaladoras, puso en marcha un ensayo de evaluación de 38 modelos de emisores en condiciones de campo. Tras analizar los resultados obtenidos en dos campañas de evaluación se realizó una selección de 20 modelos a los que se les está realizando un seguimiento en diferentes condiciones de trabajo.

## 2- Materiales y métodos

El ensayo se ha desarrollado en un invernadero experimental multitúnel de  $1200 \text{ m}^2$ , situado en las instalaciones que posee el Centro IFAPA La Mojonera en La Cañada (Almería) y equipado con control automático de clima y de riego. Este invernadero dispone de un banco de pruebas de emisores, preparado para evaluar 240 líneas de riego. Se estableció un diseño experimental factorial con dos factores, tipo de emisor y manejo del riego, con tres repeticiones en bloques al azar, donde la unidad experimental básica ha sido el lateral de riego (Figura 1). Los tipos de emisores evaluados fueron 20 modelos comerciales de goteros seleccionados en estudios previos (Contreras et al. 2013) (Tabla 1).

**Tabla 1.** Selección de emisores evaluados

	MODELO	FABRICANTE	TIPO DE INSERCIÓN	COMPENSACIÓN DE CAUDAL
1	T D Advanced OL	MONDRAGON	pinchado	NO
2	ADO	CAUDAL	pinchado	SI
3	Interlinea 12	HIDROTEN	interlinea	NO
4	NYA	PRIMARAM	Interlinea	NO
5	PCJ	NETAFIN	pinchado	SI
6	Conico desmontable	HIDROTEN	pinchado	NO
7	PC-CNL	NETAFIN	pinchado	SI
8	TD Advanced M	MONDRAGON	pinchado	NO
9	Hydrogol	JOHN DEERE WATER	integrado	NO
10	AGR	AZUD	Interlinea	NO
11	AmnonDrip	NAANDANJAIN Iberica	integrado	SI
12	Interlinea 16	HIDROTEN	interlinea	NO
13	Interlinea 16	AMACOM	Interlinea	NO
14	PRO	AZUD	Integrado	NO
15	Megadrip	MONDRAGON	Integrado	SI
16	Topdrip	NAANDANJAIN Iberica	integrado	SI
17	Hydro PC	JOHN DEERE WATER	Integrado	SI
18	Unirran	NETAFIN	Integrado	SI
19	LIN	Extruline Caudal	Integrado	NO
20	ARIES	NETAFIN	Integrado	NO

En el invernadero de pruebas, los emisores se sometieron a pulsos continuos de riego de 30 minutos, realizando 5 aplicaciones semanales durante un periodo de 20 semanas, con un gasto aproximado de agua de 150 L emisor<sup>-1</sup>, equivalente a una campaña de riego en un ciclo medio de cultivos hortícolas en invernadero. El agua utilizada ha sido agua residual urbana procedente de la ciudad de Almería y regenerada mediante tratamiento terciario de filtración, ozonización y/o cloración.

En lo que respecta al manejo de riego se dispusieron tres tratamientos:

**T1**-Riego con agua residual urbana regenerada.

**T2**-Fertirriego con agua residual urbana regenerada+equilibrio fertilizante estándar.

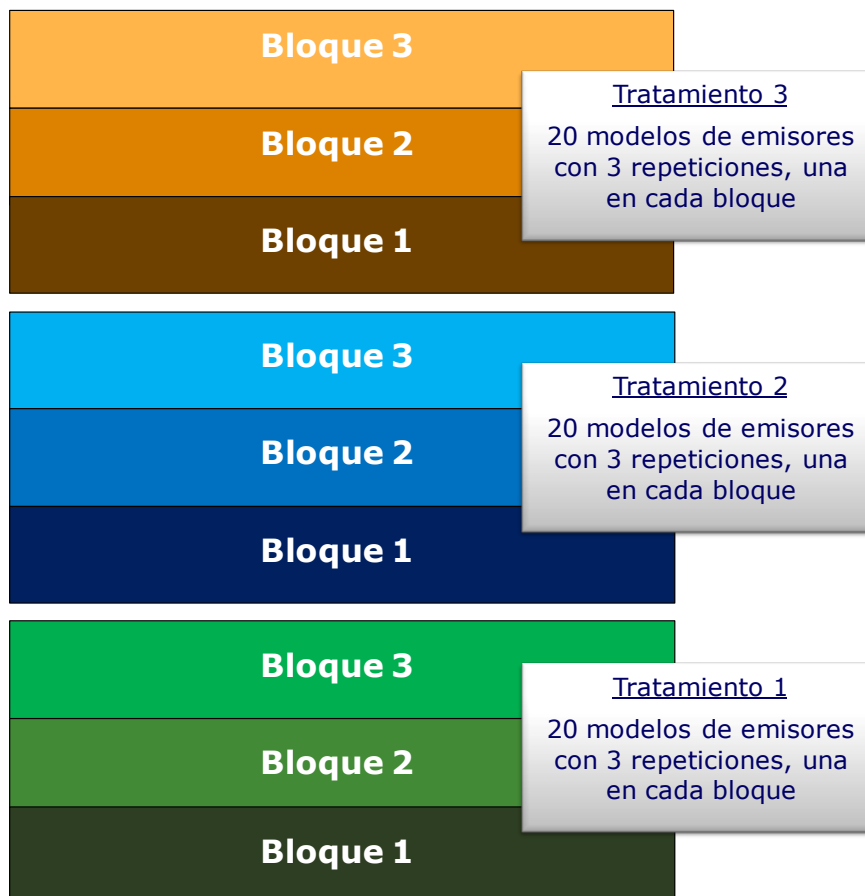
**T3**-Fertirriego con agua residual urbana regenerada+equilibrio fertilizante estándar+mantenimiento.

El equilibrio fertilizante estándar consistió en una solución nutritiva media para el cultivo de tomate bajo abrigo.

Las labores de mantenimiento practicadas al tratamiento T3 fueron:

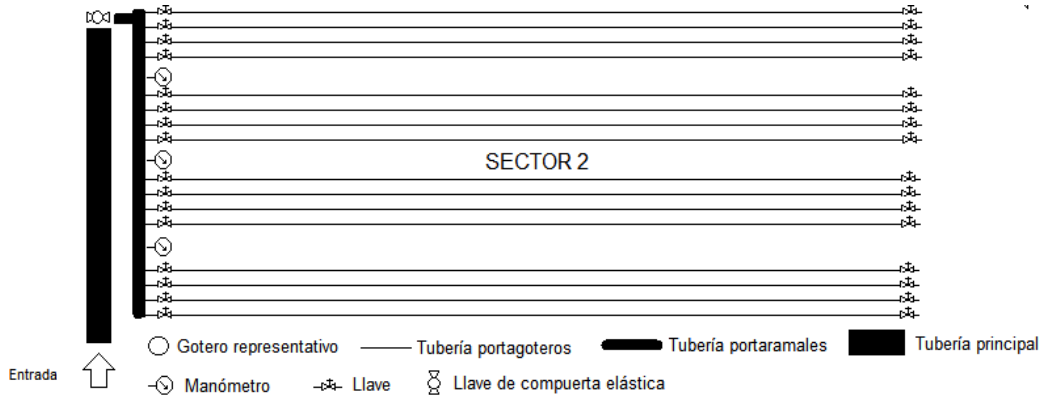
- Apertura durante varios segundos de los tapones finales de los ramales de riego para la limpieza de los sedimentos. Esta labor se realizaba con una periodicidad mensual.
- Mantenimiento del pH de la solución de riego en valor constante de pH 6 para evitar la formación de precipitados.

A los tratamientos T1 y T2 no se les realizó labor alguna de mantenimiento.



**Figura 1.** Diseño experimental del ensayo.

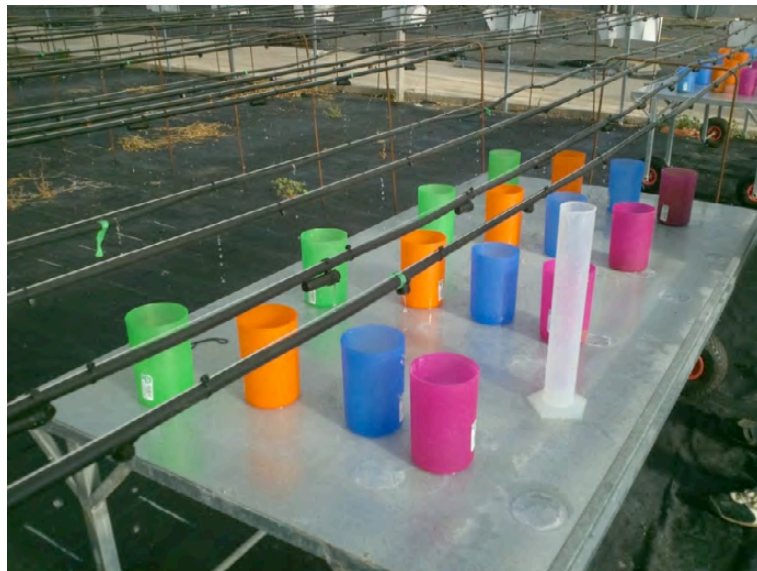
El ensayo está dividido en 3 sectores de riego, cada uno de los cuales corresponde a un tratamiento. El sector cuenta con 60 laterales de riego, una válvula de regulación a la entrada y 5 manómetros de control distribuidos a lo largo de la tubería portalamales (Figura 2). Tanto en las aplicaciones de riego como en las evaluaciones se ha mantenido una altura manométrica constante de 1,5 bar. La longitud de los laterales es de 16 m, equivalentes a 31 emisores.



**Figura 2.** Esquema de un sector de la red de evaluación. En cada lateral de 31 emisores se han medido 16 emisores representativos.

El invernadero se equipó con un sistema de drenaje que permitió la evacuación del agua aplicada. El agua utilizada ha sido suministrada por la Comunidad de Regantes Las Cuatro Vegas, responsable de la regeneración y distribución de las aguas residuales urbanas regeneradas de la ciudad de Almería.

Se realizó una evaluación de caudales inicial (antes de comenzar la campaña de riego) y otra final, así como evaluaciones intermedias mensuales. La toma de datos se ha facilitado con el uso de cuatro carros de muestreo, con una capacidad individual de 16 mediciones de volumen (Foto 1). Se determinó el coeficiente de uniformidad de caudales y el porcentaje de reducción de caudal, como indicador de la obturación.



**Foto 1.** Carro empleado en la toma de muestras.



El coeficiente de uniformidad de caudales se ha estimado utilizando la metodología clásica planteada por John L. Merriam y Jack Keller en 1978, cuya expresión de cálculo es la siguiente:

$$CUC = (q_{25\%} / q_m) * 100$$

Siendo:

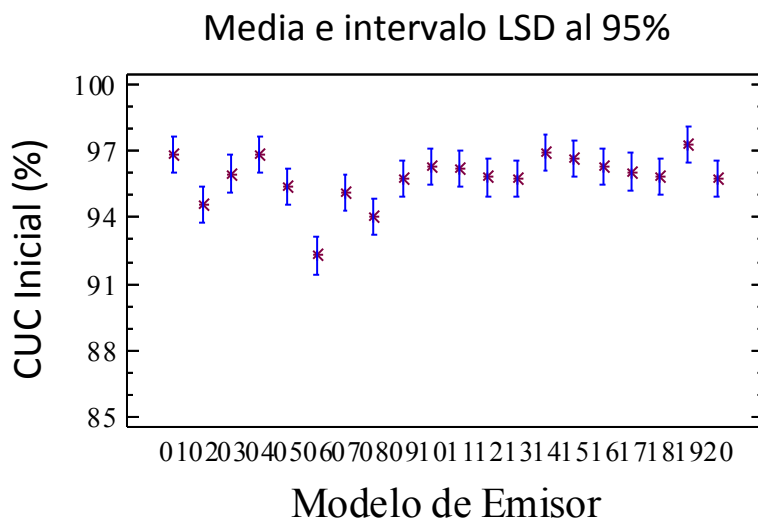
CUC = Coeficiente de Uniformidad de Caudal, en tanto por 100.  
 $q_{25\%}$  = Promedio de los caudales del 25% de los emisores, cuyo caudal sea de menor valor.  
 $q_m$  = Promedio del caudal del total de los emisores.

CUC	Calificación
>95%	Excelente
85%-95%	Buena
80%-85%	Aceptable
70%-80%	Pobre
<70%	Inaceptable

Los resultados han sido analizados estadísticamente con el software STATGRAPHICS Plus (versión 5.1). Se realizó un análisis multifactorial ANOVA para identificar la significación de los factores estudiados. Cuando el análisis estadístico reveló diferencias significativas entre tratamientos se aplicó un test de comparación de media (LSD; mínima diferencia significativa) con  $p \leq 0.05$ .

### 3.- Resultados y conclusiones

Los emisores estudiados han obtenido un coeficiente inicial de uniformidad de caudal superior al 90 % en todos los modelos, siendo en 17 de los 20 modelos superior al 95%. Estos valores corroboran la buena calidad del material de partida (Figura 3).



**Figura 3.** Coeficiente de Uniformidad de Caudal (CUC) inicial, en tanto por cien, para los 20 modelos analizados. Se ha representado el intervalo de Mínima Diferencia Significativa (LSD) al 95%.

**Tabla 2.** Nivel de significación de los factores estudiados e interacciones entre factores.

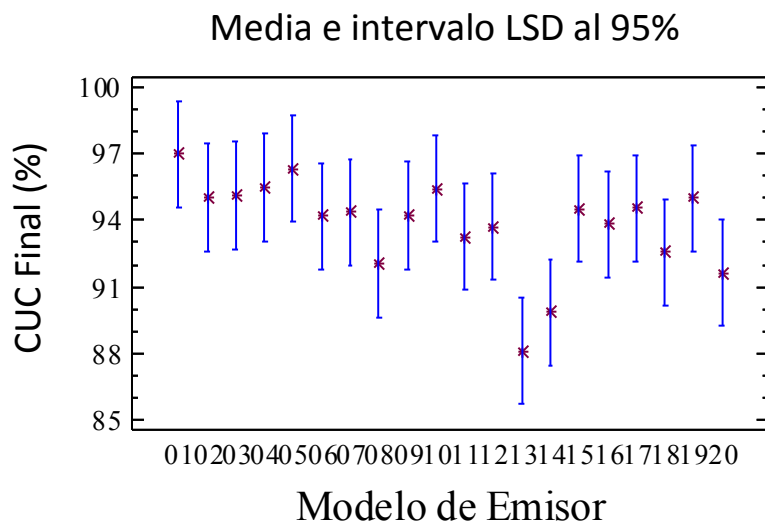
	CUC Inicial (%)	CUC Final (%)	% Reducción caudal
<b>Factor</b>			
A: Tratamiento	ns	ns	ns
B: Modelo Emisor	**	*	**
<b>Interacción</b>			
AB	ns	ns	ns

ns, no significativo.

\*Significativo para  $P < 0.05$ .

\*\*Significativo para  $P < 0.001$ .

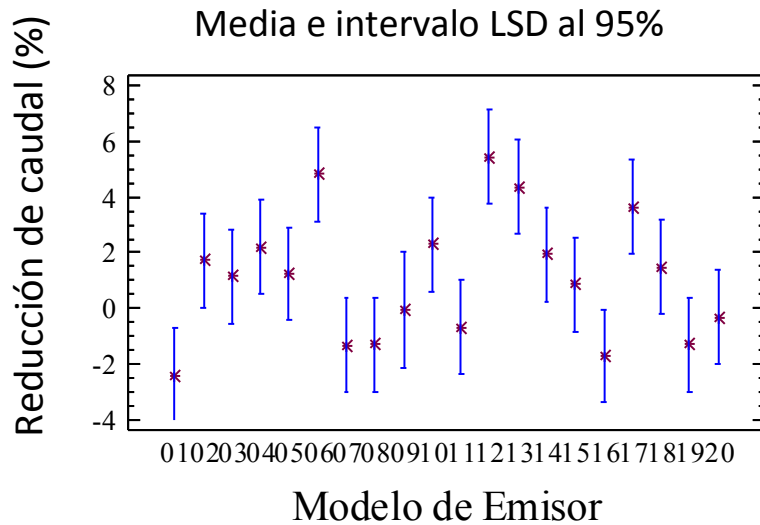
Tras la primera campaña de riego, el modelo de emisor ha influido significativamente en la respuesta a la uniformidad de caudal (Tabla 2). Únicamente 6 de los 20 emisores mantienen una uniformidad superior al 95%. No obstante sólo en uno de los modelos se ha determinado una uniformidad inferior al 90% (Figura 4). Al avanzar la campaña ha aumentado la dispersión de los valores de uniformidad, pudiéndose afirmar por tanto que se está produciendo efecto en los emisores (Figuras 3 y 4). Sin embargo este efecto no ha permitido aún observar diferencias significativas entre tratamientos (Tabla 2). Será necesario someter a los emisores a varias campañas de riego para poder sacar conclusiones a este respecto.



**Figura 4.** Coeficiente de Uniformidad de Caudal (CUC) final, en tanto por cien, obtenido en la primera campaña para los 20 modelos analizados. Se ha representado el intervalo de Mínima Diferencia Significativa (LSD) al 95%.

En esta primera campaña de riego los porcentajes de obturación sufridos por los emisores son bajos. Sólo en tres de los modelos evaluados el porcentaje de obturación es superior al 4%. Este es un fenómeno que con déficit de mantenimiento va incrementándose al aumentar el trabajo del emisor. Es difícil, con una única campaña de riego, dilucidar que

modelos tienen un mejor comportamiento en este aspecto. Previsiblemente se obtendrán conclusiones definitivas al respecto en las próximas campañas de riego (Figura 5).



**Figura 5.** Porcentaje de reducción de caudal con respecto al caudal inicial (obturación) en función del modelo de emisor. Se ha representado el intervalo de Mínima Diferencia Significativa (LSD) al 95%.

#### 4.-Agradecimientos

El trabajo ha sido cofinanciado por Fondos Europeos (FSE y FEDER) y la Consejería de Agricultura y Pesca (IFAPA Junta de Andalucía) mediante el Proyecto Transforma Conecta SAR (PP.TRA.TRA201300.10).

#### 5.- Bibliografía

- Baeza Cano, R., Gavilán Zafra, P., Del Castillo Lupiáñez, N., Berenguel, P., López Segura, J.G. 2010. Programa de evaluación y asesoramiento en instalaciones de riego en invernadero con uso de dos fuentes distintas de agua: subterránea y regenerada. XXVIII Congreso Nacional de Riegos. León 15-17 Junio de 2010.
- Capra, A., Scicolone, B. 2004. Emitter and filter test for wastewater reuse by drip irrigation. *Agricultural Water Management* 68: 135-149.
- Contreras Paris, J.I. 2014. Optimización de las estrategias de fertirrigación de cultivos hortícolas en invernadero utilizando aguas de baja calidad (agua salina y agua regenerada) en condiciones del litoral de Andalucía. Tesis Doctoral. Universidad de Almería.
- Contreras París, J.I., Baeza Cano, R., López Segura, J.G., Gavilán Zafra, P. 2012. Comportamiento de emisores de riego localizado de bajo caudal con aguas residuales urbanas regeneradas. XXX Congreso Nacional de Riegos. 12-14 Junio de 2012.
- Merriam, J.L. Keller, J. 1978. *Farm irrigation system evaluation: a guide for management*. Utah State University.
- Ravina, I., Paz, E., Sofer, Z., Marcu, A., Shisha, A., Sagi, G. 1992. Control of emitter clogging in drip irrigation with reclaimed wastewater. *Irrigación Science* 13:129-139.



## INNOVACIONES TECNOLÓGICAS INCORPORADAS EN LA COMUNIDAD DE REGANTES DE L'ALCÚDIA (VALENCIA)

*Carbonell Solbes N.<sup>1</sup>, Pardo Cuenca, Coral<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Ingeniero Superior de Proyectos, Obra y Explotación de la Oficina de Valencia de SEIASA,  
E-mail: [n.carbonell@seiasa.es](mailto:n.carbonell@seiasa.es).

<sup>2</sup>Técnico Medio de Obras del Grupo TRAGSA en la Gerencia de Valencia,  
E-mail: [cpardo1@tragsa.es](mailto:cpardo1@tragsa.es)

### Resumen

Este trabajo pretende transmitir cómo las obras de “**MEJORA DEL SISTEMA DE RIEGO EN EL SECTOR II – FASE I Y FASE II, L'ALCÚDIA, DE LA ZONA REGABLE DEL CANAL JÚCAR – TURIA (VALENCIA)**” han contribuido a la optimización de los regadíos de la zona incorporando innovaciones tecnológicas fruto del esfuerzo conjunto entre Ministerio de Agricultura, SEIASA, Consellería de Presidencia y Agricultura, Pesca, Alimentación y Agua, la propia Comunidad de Regantes y Tragsa. Estas innovaciones incorporadas en dichas obras se clasifican en las siguientes áreas:

- Innovación en hidrante multiusuario.
- Sistema de monitorización ambiental multipropósito.
- Mejora de la gestión integral hídrica y energética.
- Mejora medioambiental.
- Mejora de calidad de las aguas y seguridad en abastecimiento hídrico en las Comunidades de Regantes en periodos de sequía.

### 1- Introducción y objetivos

El 13 de noviembre de 1985 se constituye la **Comunidad General de Usuarios del Canal Júcar-Turia**. Por orden de la Conselleria de Medio Ambiente de fecha de 9 de abril de 1.996 se aprueba el Plan de Obras de Interés General para la modernización del regadío de la zona regable del Canal Júcar-Turia. La Comunidad General, a través de sus Comunidades de base, se ha caracterizado por la decisión de acometer de forma continuada dicho Plan de Obras.

En el momento actual, el Canal Júcar-Turia, constituye el eje de una amplia zona de regadíos de **25.000 has**, con un número aproximado de **35.000 usuarios**. Dichos usuarios forman parte de diferentes comunidades de regantes, siendo 7 las Comunidades de la Subzona Margen Izquierda y de 14 Comunidades de Regantes pertenecientes a la Subzona Margen Derecha.

Sus regantes poseen un perfil innovador y, por tanto, aúnan esfuerzos para impulsar nuevos cultivos que proporcionen riqueza y estabilidad. No es posible mencionar el Canal Júcar Turia sin destacar la revolución que el Caqui ha trasladado a su zona regable, con la proyección comercial que la Denominación de Origen “KAKI Ribera del Xúquer” ha posibilitado. Con el fin de seguir desarrollando cultivos competitivos se puede observar



como los agricultores de la zona prueban cambios varietales, principalmente en frutales de hueso (albaricoque, melocotón, paraguay, nectarina...) y realizan importantes inversiones.

Hoy en día, gracias a la decisión unánime de mejorar la competitividad de sus cultivos, los agricultores, con ayuda de Instituciones Públicas y Privadas, han posibilitado la realización de nuevas inversiones para mejorar sus regadíos, con una tendencia clara hacia la tecnificación y profesionalización en la gestión técnica y administrativa.

En la modernización de regadíos se aplican las tecnologías y recursos adaptados a cada zona para lograr una mayor eficacia en el riego repercutiendo significativamente en una mejora en la gestión y uso eficiente del agua.

Este trabajo pretende transmitir cómo las obras de **“MEJORA DEL SISTEMA DE RIEGO EN EL SECTOR II – FASE I Y FASE II, L’ALCÚDIA, DE LA ZONA REGABLE DEL CANAL JÚCAR – TURIA (VALENCIA)”** han contribuido a la optimización de los regadíos de la zona incorporando innovaciones tecnológicas fruto del esfuerzo conjunto entre Ministerio de Agricultura, SEIASA, Consellería de Presidencia y Agricultura, Pesca, Alimentación y Agua, la propia Comunidad de Regantes y Tragsa.

Como antecedentes indicaremos que en 2003 fue redactado el proyecto de Mejora del Sector II, L’Alcúdia, el cual, fue distribuido en dos fases, dos obras independientes.

El Sector II – L’Alcúdia se encuentra en el margen derecho del Canal Júcar- Turia, y está delimitado por la Acequia Real del Júcar, la Riera de la Dehesa, la Riera del Saboner, el T.M. de Benimodo, la Riera de Matamoros, el Canal Júcar– Turia y la Rambla de la Señora hasta la Acequia Real del Júcar.

El sistema utilizado del riego antes de la modernización era en superficie (o a manta), de manera que existía una red extensa de acequias que partiendo de las tomas efectuadas en el Canal distribuían el agua a todo el sector.

El promotor de la fase I fue el Ministerio de Agricultura comenzando en mayo de 2007 y finalizando en Abril de 2012. Esta obra de la fase I de l’Alcúdia comprendió los elementos de cabecera (depósitos de almacenamiento, estaciones de bombeo, cabezales de filtrado y fertirrigación e instalaciones eléctricas) y la red principal.

La segunda fase de la obra fue realizada entre 2012 y 2014 mediante el convenio entre SEIASA, la Comunidad de Regantes Sector II La Garrofera-L’Alcúdia y la Consellería de Presidencia y Agricultura, Pesca, Alimentación y Agua, comprendiendo la terminación de la red secundaria y completando la totalidad de la modernización del regadío para su uso por el usuario (red terciaria, hidrantes, sistema de telecontrol, asfaltado de caminos, construcción de una nueva estación de bombeo, etc.)

La empresa Tragsa fue la encargada de ejecutar toda la obra, tanto la Fase I como la Fase II.

Las infraestructuras realizadas con la transformación al riego localizado abastecen una superficie regable de 813 ha, cítricos mayoritariamente y caqui, siendo 978 los regantes beneficiarios dentro de los T.T.M.M. de l’Alcúdia, Alzira y Guadassuar.

Esta obra, esfuerzo conjunto de todos los Organismos e Instituciones implicadas así como de la propia Comunidad de Regantes, ha permitido la optimización de los regadíos de la zona desarrollando y aplicando innovaciones tecnológicas.

Las exigencias en las obras de modernización de regadíos se han incrementado en los últimos años debido a:

- Una elevada competitividad en el mercado que requiere una alta eficiencia en la producción así como una necesaria optimización de los costes (en los que se incluye los gastos de agua, energía, fertirrigación y mano de obra en explotación).
- La necesidad de facilitar el manejo, gestión y explotación del riego, mediante herramientas informativas que mejoren la calidad de vida del regante.
- Los continuos incrementos en el precio de la energía y variaciones de las tarifas eléctricas según las distintas épocas del año y horarios.
- La alta incidencia de los robos en los equipamientos de riego en el campo.
- La obligación de alertar y reducir los daños ocasionados por los agentes meteorológicos.

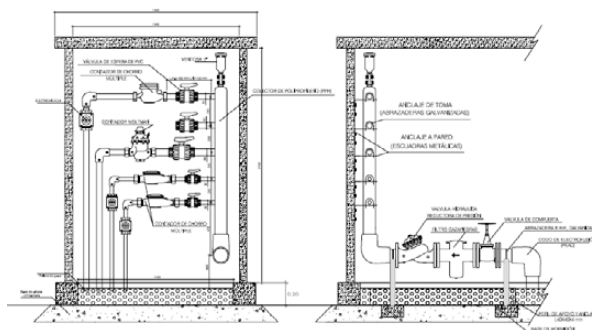
Por tanto, en las actuaciones realizadas en la Comunidad de Regantes de L'Alcúdia se han incorporado nuevos avances tecnológicos obteniendo la modernización de los regadíos exigida en la actualidad.

## 2- Mejoras e innovaciones tecnológicas aplicadas a la modernización de regadíos.

La aportación a la innovación tecnológica que se presenta se puede clasificar en las siguientes áreas:

- Innovación en hidrante multiusuario

Se implanta una novedosa tipología de hidrante multiusuario "Tipo Costella" (Figura 1) con una serie de ventajas, destacando los colectores de material plástico.



**Figura 1.** Esquema hidrante multiusuario "Tipo Costella"

La definición de colector establecido en la UNE 53943:2009 indica que es un elemento compuesto por un tubo vertical u horizontal, que alimenta los contadores divisionarios sirviendo de soporte a dichos aparatos y a sus válvulas.



Dentro de la toma de decisiones relevantes en la vida útil de las instalaciones sobre el equipamiento a instalar es la correcta selección de los materiales en virtud del uso que vaya a hacerse del mismo, de la ubicación, del mantenimiento que se vaya a realizar y de la calidad de agua que vaya a emplearse en el riego.

El colector del hidrante de riego es un elemento que tradicionalmente ha sido ejecutado con materiales metálicos, acero al carbono con tratamientos o no de galvanizado o pintura epoxi. Hoy en día, con la incorporación en los sistemas de riego de aguas con productos químicos (para fertirrigación o limpieza de tuberías), de aguas residuales o salinas, o bien aguas de diversos orígenes con alto grado de poder de oxidación, ha provocado que se busquen alternativas a estos materiales metálicos.

Al ser el colector la pieza clave del hidrante debe ser sometido a unos procesos adecuados de calidad que garanticen su estanqueidad y una resistencia mecánica adecuada, para ello, en función de las características de la instalación se ha de determinar cuál es el mejor material plástico.

En cuanto a los materiales plásticos más utilizados en colectores para hidrantes de riego encontramos el polietileno de alta densidad (PP) y el polipropileno (PPR o PPH) (Figura 2) que presentan características diferentes entre sí, siendo las más notorias la rigidez y el coeficiente de dilatación las cuales confieren características diferentes a ambos materiales.



**Figura 2.** Colector de polipropileno. CCRR L'Alcúdia

La selección de materiales plásticos en colectores de hidrantes de riego ha sido principalmente debido a que los colectores metálicos, por causas diversas, han presentado en alguna ocasión oxidaciones importantes con difícil solución técnica.

Los colectores plásticos para hidrantes comunitarios presentan las siguientes ventajas clave frente a los metálicos:

- Menor peso que los mismos en metal.
- Comportamiento excelente ante corrosión.
- Mayor facilidad de montaje al tener menor peso.
- Durabilidad.
- Menor rozamiento y menor conductividad

Por contrapartida podemos encontrar algunos inconvenientes como mayor coeficiente de dilatación que los realizados en materiales metálicos y el precio.

A pesar de que inicialmente supongan un coste más elevado que los metálicos, por precio de material y por su montaje (soldaduras), no requieren de mantenimiento (repintado) ni problemas de oxidación y, técnicamente, al igual que los metálicos, son materiales que han demostrado ser aptos para su uso como colectores en hidrantes de riego.

Los resultados obtenidos en la Comunidad de Regantes de L'Alcúdia dónde se han instalado colectores plásticos son excelentes, al igual que en otras comunidades.

A la hora de instalar los elementos que componen un hidrante multiusuario, nuestro innovador "Tipo Costella" posee una ventaja sobre los hidrantes en "T" comúnmente instalados, la colocación de sus contadores de chorro múltiple en posición horizontal y el poder mantener las distancias rectas requeridas en los woltmann.

Como sabemos, los contadores de chorro múltiple, son los más utilizados en los hidrantes multiusuario y su posición óptima de instalación, horizontal. Una instalación inclinada o en vertical es muy habitual pero inadecuada, reducen la sensibilidad del contador a caudales bajos y perjudican la vida útil del mismo al apoyar la turbina sobre el eje de manera incorrecta.

El principal parámetro que afecta a la metrología de los contadores tipo woltmann es la distorsión del perfil de velocidades que se genera cuando no se mantienen las distancias rectas requeridas aguas arriba. En estos casos, el resultado de la medición es impredecible, y no se garantiza una mínima calidad de medida donde puede salir perjudicado tanto el usuario como el suministrador.

Otros aspectos innovadores a destacar de este nuevo hidrante multiusuario "Tipo Costella" son:

- Máxima maniobrabilidad en explotación, con una disposición compacta, que deja un amplio espacio de trabajo dentro de la caseta del hidrante (Figura 3).



**Figura 3.** Hidrante instalado en la CCRR L'Alcúdia.

- Minimizar los robos y actos vandálicos, con la incorporación de una puerta metálica con perfiles de refuerzo, cerradura con tres puntos de anclaje y bisagras antivandálicas así como sensores de intrusión (Figura 4) y zumbido en el interior del hidrante avisando que ha

sido detectado, los contadores de plástico incorporados también son disuasorios frente al robo.



**Figura 4.** Sensor de intrusión y refuerzo con perfiles en puerta de hidrante.

- Sistema de monitorización ambiental multipropósito

A nivel práctico, en la Comunidad de Regantes de l'Alcúdia, se ha innovado en monitorización ambiental incorporando tres módulos de aplicación:

- Detección precoz de heladas.
- Compatibilización de Agricultura Ecológica.
- Control del perfil de humedad del suelo y riego eficiente.

Para la prevención temprana de heladas se han instalado sondas de temperatura y humedad relativa previamente calibradas en emplazamientos estratégicos obteniendo así los datos de las zonas más sensibles a heladas.

Los datos de temperatura y humedad relativa de estas sondas se leen cada 15 minutos enviándolos vía web al centro de control y procesándolos para:

- Obtención de gráficas de seguimiento.
- Gestión de alarmas.

Con el programa de monitorización ambiental implantado en la Comunidad de Regantes de L'Alcúdia controlamos la temperatura mínima a la que deseamos que se dispare la "alarma anti-heladas". Pueden programarse alarmas para cada punto de lectura de temperatura y, en función del tipo de sistema antihelada y las características de la red de riego, se configuran unas alarmas que actúan, de forma automática, sobre el programador de riego (telecontrol) activando las parcelas correspondientes.

Este sistema posee una doble función. Protección ante las heladas y poder controlar de forma contrastada las horas frío necesarias en algunas variedades de frutales de hueso, cultivando así nuevas variedades o cultivos que sin este dispositivo no serían posibles.

La Comunidad de Regantes dispone de un sensor de Temperatura y HR móvil que instalando en cualquier punto puede comprobar perfiles de temperatura a diferentes alturas y desde el software (figura 5) cambiar fácilmente el umbral de alarma que queremos programar para cada día.



**Figura 5.** Software antiheladas.

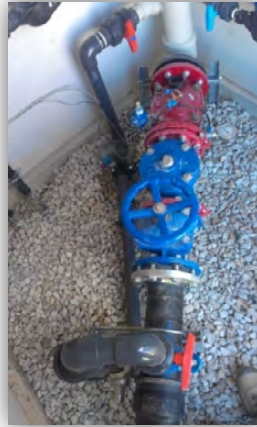
En el ámbito de la Comunidad de Regantes del Sector II de L'Alcúdia existe una importante superficie dedicada al cultivo ecológico y por ello, se ha implantado un sistema de monitorización que permite controlar la presencia en el agua de riego de fertilizantes y otros productos permitidos en la agricultura tradicional, pero no en la agricultura ecológica, elaborando un Informe automáticamente emitido por la Comunidad de Regantes para los usuarios que soliciten necesaria la certificación de sus productos (GlobalGap, Naturane...).

Los dos cabezales de la red disponen de instalaciones de inyección de abono líquido y mediante un programa informático se ha conseguido una modelización hidráulica de la red (figura 6) para conocer, en cada momento, la concentración de producto y su distribución en la red de tuberías, es decir, se analiza el comportamiento hidráulico de la red desde el punto de vista de la calidad de las aguas conociendo el tiempo que tarda la red en limpiarse de agua mezclada con fertilizante para cualquier punto de la misma.



**Figura 6.** Modelización de la red.

Estos datos obtenidos mediante la modelización matemática se validan en campo gracias a la información de sensores de pH y conductividad eléctrica, parámetros de calidad del agua, distribuidos en la red de riego en cinco hidrantes testigo (figura 7) y en los cabezales. Las lecturas de pH y CE son tomadas cada 15 o 20 minutos y transmitidas inalámbricamente de una estación concentradora a un servidor central vía GSM/GPRS. Este servidor central es un servidor web que permite el acceso por Internet para visualizar las medidas y estado de los sensores de manera instantánea.

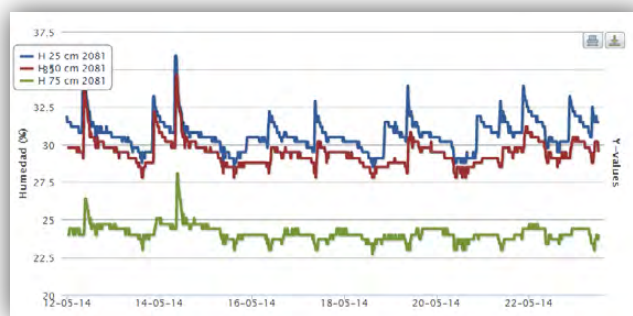


**Figura 7.** Sondas de pH y CE en hidrante

Este innovador sistema de monitorización ambiental cumple dos objetivos:

- Posibilidad de poder realizar Agricultura con Certificación Ecológica cumpliendo con todos los requisitos aplicables sin interferir en los intereses de la agricultura tradicional. Emisión de certificados consensuados con el CAECV.
- Asegurar que las concentraciones de fertilizantes que llegan a las parcelas de cultivo tradicional se realizan de forma adecuada y homogénea aportando abonados muy puntuales por cultivos o en diferentes momentos fenológicos de la planta mejorando así la calidad de los productos.

También se ha incorporado en la Comunidad de Regantes de L'Alcúdia sensores de medida de la temperatura y humedad relativa del aire, de la humedad del suelo (figura 8) y una estación meteorológica, permitiendo, con estos datos, una gestión más eficiente.



**Figura 8.** Frente húmedo a diferentes profundidades y tiempos de riego.

- Mejora de la gestión integral hídrica y energética

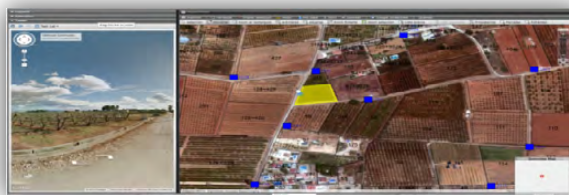
En los últimos tiempos ya nadie discute las ventajas que supone tener un Sistema de Información Geográfico (GIS o SIG), basadas en la asombrosa capacidad de gestión que se logra y la posibilidad de disponer e intercambiar información de cualquier tipo a través de medios como Internet.

Un SIG podría definirse de manera estándar como un complejo sistema de “hardware” y “software” que tiene como objeto la comprensión y análisis de datos espaciales



georreferenciados cuyo fin último es ayudar a las diversas actividades humanas donde los datos espaciales tienen un papel determinante.

En la Comunidad de Regantes de L'Alcúdia se ha incorporado esta innovadora herramienta, un GIS y VISOR GIS (figura 9) con el fin de poder explotar la información gráficamente y gestionar todos los parámetros de la red en el mismo entorno.



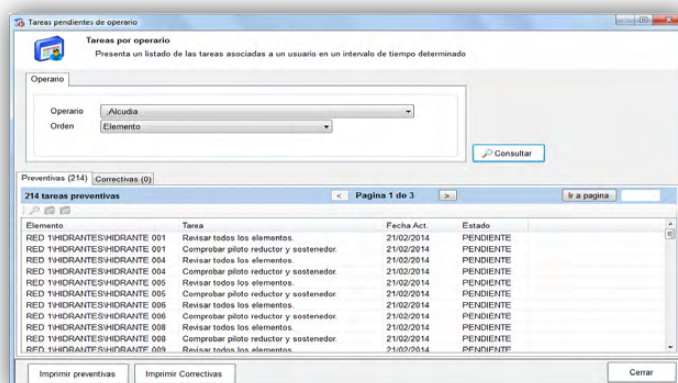
**Figura 9.** Visor GIS.

Todos los programas de la Comunidad de Regantes han quedado vinculados (uniendo telecontrol, catastro, sensórica, programa de mantenimiento...) introduciendo en el GIS todos los datos de la red ejecutada con una vista directa en el plano de datos (diámetro tuberías, materiales, arquetas, datos de propietario, etc.) facilitando así la gestión y explotación de los múltiples datos que tiene una Comunidad de Regantes.

Para una gestión que no implique estar delante del ordenador y que pueda visualizarse y manejarse desde cualquier punto se ha desarrollado su aplicación para móvil y tablet. Por tanto, se puede decir que llevamos en el teléfono o tablet los planos "de bolsillo". Se ha desarrollado una personalización completa a las necesidades e inquietudes de la Comunidad de Regantes.

El visor GIS (con acceso on line) se ha desarrollado para que el personal de la Comunidad de Regantes pueda visualizar de forma sencilla los datos contenidos en el GIS.

Se ha incorporado un programa de mantenimiento vinculado al GIS (figura 10) en el que se incluyen las tareas de mantenimiento preventivo y correctivo.



**Figura 10.** Programa de mantenimiento con aplicación para dispositivos móviles

Un requisito imprescindible para la consecución de una alta eficiencia en el riego, a parte de un diseño óptimo de las instalaciones y una ejecución adecuada, es una buena gestión en la etapa de explotación. Por ello, afirmamos, que un sistema GIS aplicado a una



comunidad de regantes es una de las mejores innovaciones tecnológicas que se pueden implantar, siendo esencial para una buena gestión integral hídrica.

Otros aspectos incorporados en L'Alcúdia dentro del área de mejora de la gestión integral hídrica y energética son:

- Analizadores de red con fin de controlar los parámetros necesarios para la optimización energética de la Comunidad de Regantes minimizando sus costes. Asimismo se da prioridad a las soluciones técnicas que minimicen el consumo de agua presurizada.

- Dos bypass de la red 1 a la red 2. En el proyecto original las dos redes eran independientes y con estos bypass hemos conseguido, por un lado, poder abastecerse de una red a otra en caso de rotura o problema en alguna de las redes y por otro, poder llenar depósito de cota desde una de las redes en horas más económicas y regar desde dicho cabezal a ambas redes durante el día, minimizando costes.

- Limitadores de caudal en las parcelas que poseen balsas propias con el fin de evitar desestabilización de caudales de la red y un eficiente consumo de agua.

- Mejora medioambiental

Se han instalado 10 bocas contra incendios en los hidrantes (figura 11) consensuando su ubicación con el agente medioambiental de la zona y cuya geolocalización es proporcionada a la brigada responsable de extinción de incendios, mejorando con ello la lucha contra incendios.

Se han incorporado 8 surtidores de toma (figura 11) facilitando el llenado de cubas para tratamientos fitosanitarios de los usuarios de la Comunidad de Regantes, con la eliminación de la posible contaminación en las recargas.



**Figura 11.** Boca de incendio y surtidor de toma.

Con el fin de evitar problemas de rotura de depósitos de fertilizantes y poder generar contaminación de suelo y aguas subterráneas se han construido unos cubetos de contención de fertilizantes.

Se ha realizado experiencia piloto de reservorios biológicos empleando las ubicaciones de las casetas de hidrante multiusuario con disponibilidad de agua para su implantación. Se han realizado plantaciones con especies vegetales en las inmediaciones como hábitat alternativo para la entomofauna auxiliar y pueden contribuir al control biológico de plagas agrícolas y disminución de fitosanitarios.

- Mejora de calidad de las aguas y seguridad en abastecimiento hídrico en las CCRR en periodos de sequía

En cuanto a la mejora de calidad de las aguas se ha establecido un sistema antialgas mediante ultrasonidos para el depósito Majada de las Cabras.

El depósito de Florentina se ha cubierto con una doble malla de rafia (figura 12) provocando una reducción de la evaporación y por tanto un ahorro hídrico considerable. Se mejora el mantenimiento del depósito y de los elementos instalados en el cabezal debido a menores concentraciones de suciedad y elementos arrastrados por el viento dentro del depósito. La cubrición del depósito también ayuda a la no proliferación de algas.



**Figura 12.** Rafia doble malla, depósito Florentina.

Para tener una seguridad en el suministro hídrico en momentos en los que la Comunidad de Regantes posea restricciones hídricas en el Canal Júcar Turia por motivos derivados de la sequía, se ha ejecutado un cabezal de inyección desde tres pozos gestionados por la misma comunidad.

### **3- Conclusiones y recomendaciones**

En cuanto a las recomendaciones indicar:

- En fase de proyecto se han de incorporar todas las medidas posibles como las expuestas que permiten a la entrega de la obra una perfecta gestión y conservación de las mismas.
- Dar la importancia que se requiere a los cultivos de la zona regable para incidir en aquellas soluciones que mejoran producciones.

Como conclusiones:

- La modernización debe repercutir en beneficio de la sociedad. Por ello todas aquellas medidas que hagan un medioambiente más sostenible harán que se perciba estas obras como positivas no solo para el sector agrario.
- Hay que proporcionar a las Comunidades de Regantes las herramientas que permitan dar un servicio a sus comuneros de excelencia. No solo de la cantidad de agua que tengan concedida, sino con la distribución en el tiempo y en horarios que se tenga la garantía de optimizar las cosechas.
- A modo de conclusión final exponemos que el coste final de las medias relacionadas ha supuesto un 4% del coste total de las obras. Y ya solo en el



primer año de explotación se han evitado heladas, se han mantenido las certificaciones ecológicas, no se han producido robos, y se tiene la constancia de modo fehaciente de un incremento de cosechas equivalente al 9%. Que sobre la superficie regada ha supuesto cerca de 250.000 kg de la mejor calidad de fruta.

#### **4- Agradecimientos**

Agradecer la estrecha colaboración entre todos los integrantes de la obra, especialmente a la Comunidad de Regantes de L'Alcudia con los cuales ha sido posible la implantación de las innovaciones descritas en el presente documento. Asimismo agradecer a todos los Organismos e Instituciones que han posibilitado su ejecución y financiación.



## **RG WIN 2015. APLICACIÓN PARA EL DISEÑO Y DIMENSIONADO DE REDES DE RIEGO A PRESIÓN EN ENTORNO EXCEL INTEGRANDO PARÁMETROS AGRONÓMICOS, ENERGÉTICOS E HIDRÁULICOS**

*Arviza Valverde, Jaime (1). Balbastre Peralta, Ibán (2), Palau Estevan, Carmen Virginia (3)*

<sup>1</sup> PDI. Universitat Politècnica de València. Dpto. Ingeniería Rural. [Jarviza@agf.upv.es](mailto:Jarviza@agf.upv.es)

<sup>2</sup> PDI. Universitat Politècnica de València. Dpto. Ingeniería Rural. [ibbalpe@agf.upv.es](mailto:ibbalpe@agf.upv.es)

<sup>3</sup> PDI. Universitat Politècnica de València. Dpto. Ingeniería Rural. [virpaes@agf.upv.es](mailto:virpaes@agf.upv.es)

### **Resumen**

En la comunicación se presentan los resultados del desarrollo de una aplicación informática en entorno Excel para el diseño y dimensionado de redes de riego a presión.

La aplicación pretende integrar las distintas fases que suponen el diseño de una red de riego a presión teniendo en consideración la información agroclimática para la determinación de los parámetros de riego que condicionan el funcionamiento del sistema. Asimismo se vinculan los cultivos y sus necesidades hídricas con las parcelas que abastecen los hidrantes de la red.

La aplicación también permite el dimensionado de subunidades y su incorporación como datos al dimensionado de la red. Permite gestionar fácilmente las bases de datos de materiales, así como el tratamiento de resultados y su exportación para posterior análisis con aplicaciones como Epanet 2.0.

La aplicación permite importar redes generadas desde Epanet, o introducir la información desde la propia interfaz. Teniendo otra serie de prestaciones que se indicarán en el trabajo.

La aplicación desarrollada pretende ser de utilidad tanto en el ámbito académico como en el profesional siendo además la misma de difusión libre.

### **Abstract**

In this paper the results of the development of a computer application in Excel using Visual Basic for application (VBA) for design and sizing of pressurized irrigation networks are presented.

The application aims to integrate the various phases involving the design of an irrigation pressure network climatic data are considering the information for determining the irrigation parameters that influence the system operation. Crops features and their water needs to plots that supply network hydrants are linked.

The application also allows the sizing of subunits and its incorporation as a data network dimensioning. Easily manage databases of materials and processing and export results for further analysis with applications such as Epanet.

The application allows you to import generated from Epanet networks, or enter the information from the interface itself. Having another set of features that are indicated in the workplace.



The developed application intended to be useful both in academia and in the professional being also the same free diffusion.

## **1. Introducción. Objetivos**

El departamento de Ingeniería Rural de la Universitat Politècnica de València (UPV) desarrolló una aplicación para el dimensionado hidráulico de redes de riego a presión (RG) en el año 1991. De la misma fueron desarrollándose diversas versiones, incluyendo más prestaciones y potencia de cálculo. Esta aplicación fue ampliamente utilizada tanto en el ámbito académico como por profesionales en proyectos de modernización de regadíos.

Los avances tecnológicos y sobre todo en el campo de la informática han exigido adaptar dicha aplicación a un entorno actualizado y de difusión general. Se optó por aprovechar todo el potencial de Microsoft Excel pues es una aplicación de uso general conocida y utilizada por una gran mayoría de usuarios tanto en el ámbito académico como técnico y profesional.

Bajo estas premisas se ha pretendido desarrollar una aplicación lo más versátil y potente posible que además sea fácil y cómoda de utilizar y permita la transferencia de información desde otras aplicaciones utilizadas en el diseño, análisis y modelización de redes de riego a presión.

Por otra parte se han integrado en la aplicación el tratamiento de la mayor parte de la información que permite abordar el diseño con un enfoque más global, incluyendo la determinación de parámetros de riego, características de cultivos, parcelas, tipos de hidrantes, dimensionado de subunidades y tratamiento de la información agroclimática.

En lo que se refiere al dimensionado de la red se han utilizado criterios de optimización técnico económica mejorando los algoritmos de cálculo y teniendo en cuenta la actual estructura de la tarificación eléctrica cuya influencia sobre la función de costes cada vez es mayor.

## **2. Materiales y métodos.**

### **2.1. Desarrollo de la aplicación**

La aplicación se ha desarrollado en Excel utilizando la potencialidad del lenguaje de programación Visual Basic for Applications (VBA).

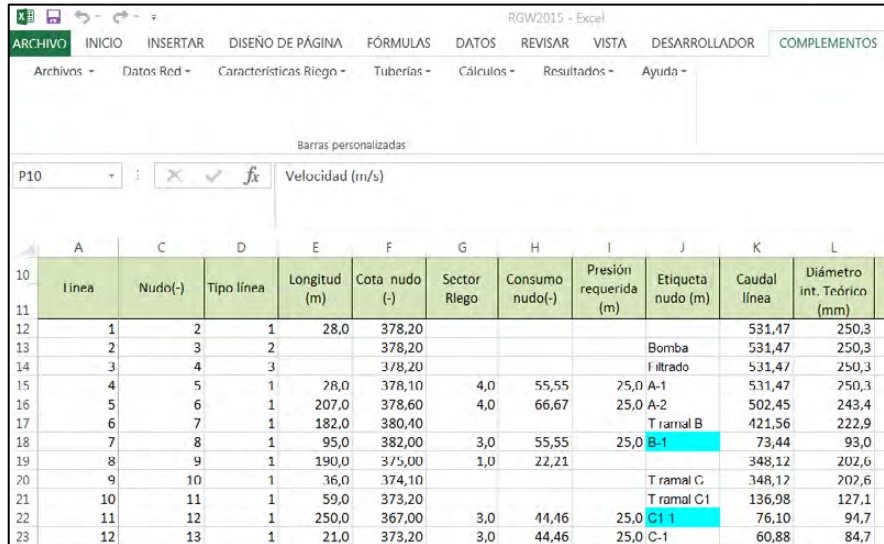
Se optó por utilizar Excel como base de la aplicación pues es una herramienta informática de uso general, con difusión mundial y totalmente reconocida. Además supone una aplicación de uso habitual tanto para técnicos, estudiantes como investigadores en el ámbito de las ingenierías, por lo que el entorno resulta conocido y fácil de manejar. Además la estructura de datos en tablas resulta idónea tanto para definir la configuración y topología de la red, como para organizar la información relativa a cultivos, parcelas, materiales y condiciones de funcionamiento de la red.

Se ha optado por el desarrollo de un Complemento o Add-Ins en Excel para el funcionamiento de la aplicación. Dicho complemento puede ser instalado de forma sencilla por cada usuario y accediendo a Complementos en el menú principal se accede al Menú conceptual de la aplicación RGWIN2015 (RGW).



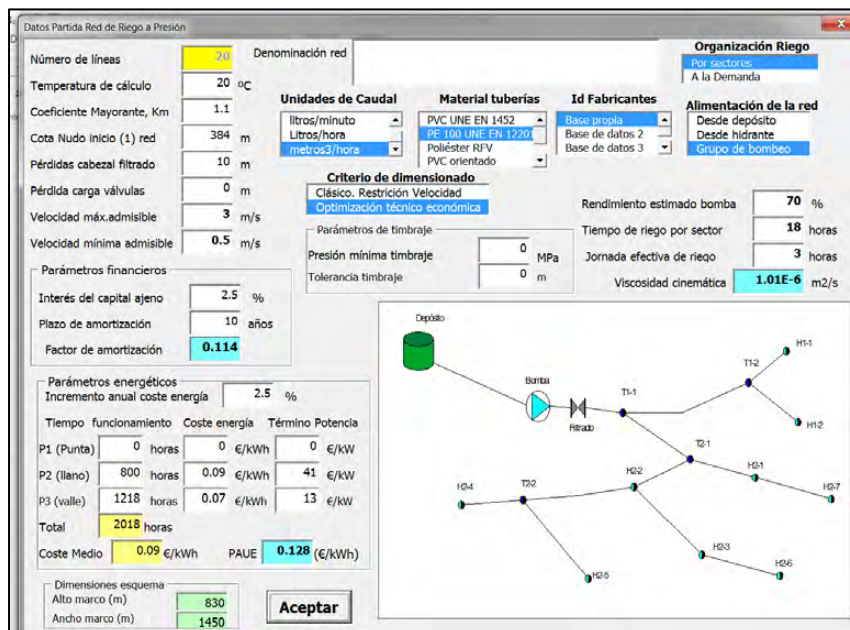
Las tablas que aparecen en las distintas hojas del libro abierto son accesibles desde los diferentes menús desplegables y la introducción de datos puede realizarse directamente en las hojas o a través de formularios específicamente diseñados a tal efecto.

Desde el menú desplegable “Datos Red” se accede a la opción “Datos Generales” donde se definen las características específicas de la red (Alimentación, Material, Criterio de dimensionado, Parámetros financieros, parámetros energéticos y tipo de red)



A	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
Linea	Nudo(-)	Tipo línea	Longitud (m)	Cota nudo (-)	Sector Riego	Consumo nudo(-)	Presión requerida (m)	Etiqueta nudo (m)	Caudal línea	Diámetro int. Teórico (mm)
1	2	1	28,0	378,20					531,47	250,3
2	3	2		378,20				Bomba	531,47	250,3
3	4	3		378,20				Filtrado	531,47	250,3
4	5	1	28,0	378,10	4,0	55,55	25,0	A-1	531,47	250,3
5	6	1	207,0	378,60	4,0	66,67	25,0	A-2	502,45	243,4
6	7	1	182,0	380,40				T ramal B	421,56	222,9
7	8	1	95,0	382,00	3,0	55,55	25,0	B-1	73,44	93,0
8	9	1	190,0	375,00	1,0	22,21			348,12	202,6
9	10	1	36,0	374,10				T ramal C	348,12	202,6
10	11	1	59,0	373,20				T ramal C1	136,98	127,1
11	12	1	250,0	367,00	3,0	44,46	25,0	C1-1	76,10	94,7
12	13	1	21,0	373,20	3,0	44,46	25,0	C-1	60,88	84,7

Figura 1: Menú de opciones de la aplicación accesible desde Complementos.



**Datos Partida Red de Riego a Presión**

Número de líneas: 20  
 Denominación red: [ ]  
 Temperatura de cálculo: 20 °C  
 Coeficiente Mayorante, Km: 1.1  
 Cota Nudo inicio (1) red: 384 m  
 Pérdidas cabezal filtrado: 10 m  
 Pérdida carga válvulas: 0 m  
 Velocidad máx.admisible: 3 m/s  
 Velocidad mínima admisible: 0.5 m/s

**Unidades de Caudal**  
 litros/minuto  
 Litros/hora  
 metros3/hora

**Material tuberías**  
 PVC UNE EN 1452  
 PE 100 UNE EN 1220  
 Poliéster RFV  
 PVC orientado

**Id Fabricantes**  
 Base propia  
 Base de datos 2  
 Base de datos 3

**Alimentación de la red**  
 Desde depósito  
 Desde hidrante  
 Grupo de bombeo

**Criterio de dimensionado**  
 Clásico. Restricción Velocidad  
 Optimización técnico económica

Parámetros de timbraje  
 Presión mínima timbraje: 0 MPa  
 Tolerancia timbraje: 0 m

Rendimiento estimado bomba: 70 %  
 Tiempo de riego por sector: 18 horas  
 Jornada efectiva de riego: 3 horas  
 Viscosidad cinemática: 1.01E-6 m2/s

**Parámetros financieros**  
 Interés del capital ajeno: 2.5 %  
 Plazo de amortización: 10 años  
 Factor de amortización: 0.114

**Parámetros energéticos**  
 Incremento anual coste energía: 2.5 %

Tiempo funcionamiento	Coste energía	Término Potencia
P1 (Punta): 0 horas	0 €/kWh	0 €/kW
P2 (llano): 800 horas	0.09 €/kWh	41 €/kW
P3 (valle): 1218 horas	0.07 €/kWh	13 €/kW
Total: 2018 horas	0.09 €/kWh	PAUE 0.128 (€/kWh)

Dimensiones esquema  
 Alto marco (m): 830  
 Ancho marco (m): 1450

**Aceptar**

Figura 2: Formulario de datos generales

La red puede ser importada desde la aplicación Epanet ver 2.0, aprovechando en ese caso el entorno gráfico de la misma para definir la topología y configuración de la red.

A su vez se ha previsto la posibilidad de trabajar con esquemas o gráficos con la configuración de la red que facilite la introducción de datos. La numeración de los nudos conectores de cada una de las líneas de la red no tiene que seguir ningún orden o



secuencia lo que facilita la identificación de estos y la modificación de datos una vez introducidos.

En cualquier caso se han desarrollado distintas rutinas de captura de errores que permiten detectar previo al cálculo de caudales. El formulario con el esquema de la red (**Figura 5**) puede estar abierto mientras se introducen los datos en la hoja correspondiente lo que facilita la comprobación de posibles errores. A continuación se muestran dos ejemplos de captura de error en la configuración de la red.

Linea	Nudo(+)	Nudo(-)	Tipo línea	Longitud (m)	Cota nudo (-)	Sector Riego
10	10	11	1	59,0	373,20	0,0
11	11	12	1	250,0	367,00	0,0
12	11	13	1	21,0	373,20	0,0
13	13	11	1	145,0	372,30	1,0

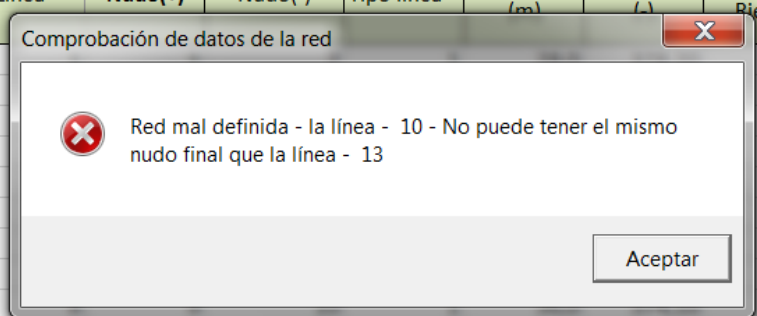


Figura 3

Linea	Nudo(+)	Nudo(-)	Tipo línea	Longitud (m)	Cota nudo (-)	Sector Riego
13	18	14	1	145,0	372,30	0,0
14	10	15	1	145,0	371,30	0,0
15	15	16	1	166,0	367,50	0,0
16	16	17	1	144,0	365,50	0,0
17	17	18	1	86,0	364,70	0,0

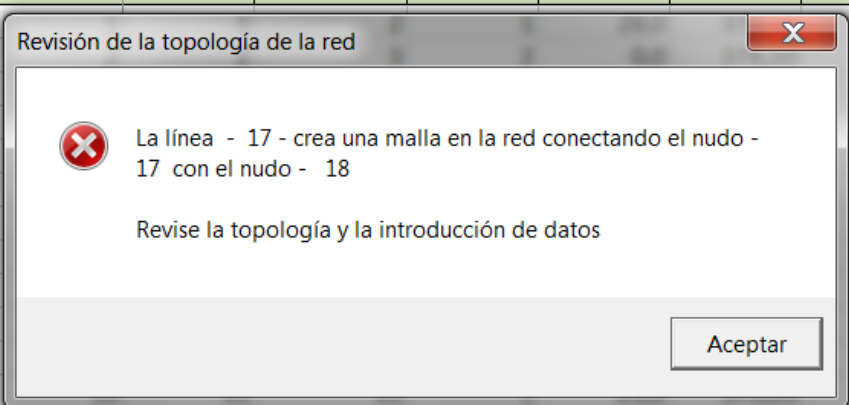
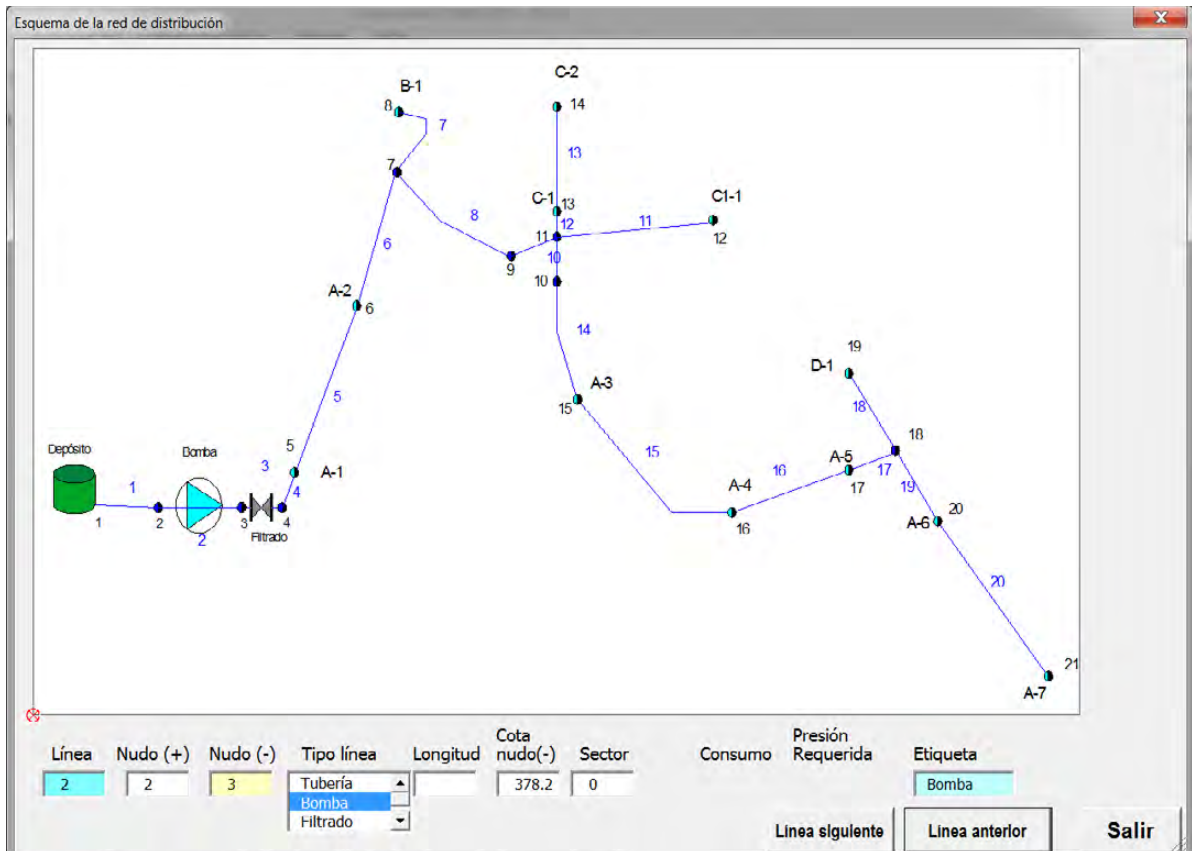


Figura 4



**Figura 5:** Esquema escalado de la red y formulario para definir la topología y características de la red

Desde el menú "Características de Riego" se accede a dos aplicaciones complementarias y vinculadas en el proceso de diseño de una red de riego:

- Diseño Agronómico RL.xlsm : Cálculo de necesidades hídricas de cultivos en sistemas de riego a presión.
- DimSub.xlsm: Dimensionado y cálculo de subunidades de riego localizado.

Los caudales circulantes por las líneas que componen la red son función de la organización del funcionamiento de la red, pudiendo ser ésta:

- Por turnos o sectores
- A la demanda

En el primer caso los consumos en nudos pueden ser introducidos directamente en la hoja "Cálculos" en la columna correspondiente o vincular el nudo aguas abajo de la línea a un hidrante que alimente a unas parcelas de unas determinadas dimensiones vinculadas a cultivos y condiciones de funcionamiento función dadas.

Datos de las parcelas afectadas por la red de riego.

Orden Parcela: 3      Identificativo Parcela: B-1

Id cultivo	Descripción	NTr(mm/día)	T.Riego(h)	Riegos/semana	Q(l/h/m2)
1	Cítricos. Provincia	3.8	3.42	7	1.11
2	Cítricos. Provincia	4.2	2.5	6	1.44
3	Cítricos. Valencia.	3.8	3.5	6	0.93

Nudo Asociado de red		
Id Línea	Id Nudo	Etiqueta
3	4	Filtrado
4	5	A-1
5	6	A-2
6	7	T ramal B
7	8	B-1

Superficie (has): 6.61

Número de subparcelas: 1

Descripción Parcela: Socio 1042 parcela 203

Número sectores: 4

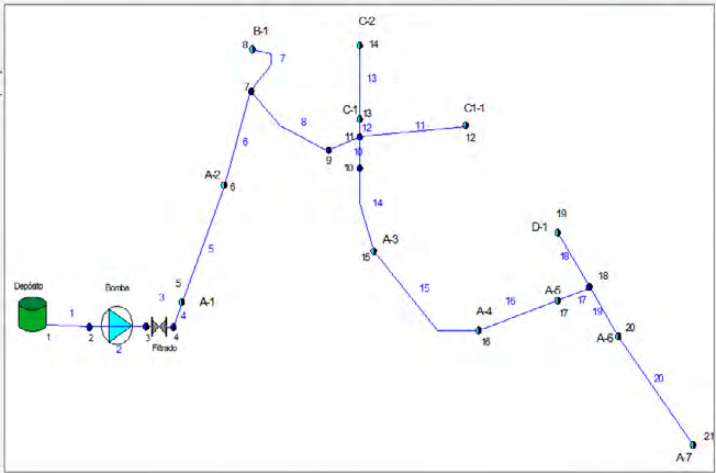
Sector de riego asignado: 1

Tiempo de riego (h): 3.42

Intervalo entre riegos: 1

caudal asignado (l/s): 20.4

**Calcular**



Eliminar Parcela      Inicial    Anterior    Siguiente    Último      Salir

Figura 6: Formulario de parcelas vinculadas a un cultivo y un nudo de la red

## 2.2. Criterios de diseño y dimensionado de la red

Una vez calculados los caudales circulantes por tramo el dimensionado de la red se realiza mediante técnicas de optimización técnico financiera.

En particular RGW utiliza el conocido método de la Serie Económica. Respecto a versiones anteriores los algoritmos de cálculo introducen mejoras en lo que se refiere a:

- Definición de la serie más desfavorable o camino crítico y la descomposición de la red en series de tuberías.
- La función de costes de instalación se ajusta al rango de caudales y velocidades en el dimensionado de cada una de las series.
- Introducción en la función de costes energéticos ( $K_1$ ) tanto los términos de energía como de potencia para los distintos periodos contemplados en la tarifa.
- Cálculo del PAUE (Pago anual unificado equivalente) relativo al coste específico de la energía considerando tanto el interés del capital ajeno ( $r$ ) como el incremento anual del coste de la energía ( $\Delta C_E$ ).

$$p = \frac{\sum_{i=1}^{np} T_{p_i} + \sum_{i=1}^{np} (T_{E_i} \times T_i)}{\sum_{i=1}^{np} T_i}$$

$$PAUE = \sum_{i=1}^t \left[ \frac{(1+r)^t \cdot r}{(1+r)^t - 1} \cdot \frac{(1+\Delta C_E)^t}{(1+r)^t} \right] \cdot p = \alpha \cdot \beta \cdot p$$

$$K_1 = \frac{\gamma \cdot Q_M \cdot PAUE}{\eta_{est}}$$

Siendo:

(np): Número de periodos de la tarifa eléctrica a contratar. ( $T_{pi}$ ): Término de potencia para cada periodo. ( $T_{E_i}$ ): Término de energía para cada periodo. ( $T_i$ ): Funcionamiento en horas de la red en cada periodo. (t): Plazo de amortización de la inversión. ( $Q_M$ ): Caudal medio en origen con organización del riego a la demanda o caudal máximo en origen para todos los sectores o turnos. ( $\eta_{est}$ ): Rendimiento estimado del grupo de bombeo.

### 3. Resultados

Para ilustrar el funcionamiento de la aplicación se ha abordado el diseño y dimensionado de una red.

Se trata de un sector que abastece 12 hidrantes multi usuario y 73 parcelas con una superficie total de 47,7 has.

Las necesidades hídricas de los cultivos han sido calculadas previamente mediante la aplicación "Diseño Agrónomico RL", así como el caudal requerido por unidad de superficie, tiempo e intervalo entre riegos para el periodo de máximos requerimientos y para el resto de la temporada.

La tarifa a contratar en la 3.1.a, habiendo cumplimentado el funcionamiento previsto en cada periodo horario en el formulario de la **Figura 2**.

El dimensionado se efectúa en dos fases (Cálculo de caudales y Calcular Red)

Una vez efectuado el dimensionado con éxito aparece un formulario con el resumen de resultados (**Figura 7**). Saliendo del formulario los resultados se listan en la hoja activa (**Figura 8**). En la columna correspondiente a la presión resultante se marcan en verde aquellas líneas cuyo nudo final es un hidrante o nudo de consumo. El déficit de presión indica para cada nudo la diferencia entre la presión requerida y la resultante.

$$Déficit_i = \frac{P_{req_i}}{\gamma} - \frac{P_{(resultante)_i}}{\gamma}$$

En el caso de requerir bomba en el nudo más desfavorable éste será nulo indicándose en color naranja la correspondiente línea. En la columna correspondiente a Nudo(-) se indica en color el camino crítico o serie más desfavorable. Por último en la siguiente columna aparecen las etiquetas identificativas. Aquellos nudos extremos de la red aparecen en color cian.

En cualquier caso si la red ha sido importada desde Epanet o se han definido las coordenadas de los nudos sobre el esquema escalado (**Figura 5**) es mucho más intuitivo y sencillo de interpretar los resultados con la opción "Ver Resultados en Esquema".

Resumen de resultados

**Alimentación de la red**

Desde depósito  
 Desde hidrante  
 Grupo de bombeo

caudal inicio red: 553.68 metros3/hora  
 Nudo (-) más defavorable: 8 Etiqueta: T ramal B  
 Déficit máximo de presión: 0 mca  
 Material de las tuberías: PE 100 UNE EN 12201

**Resumen Costes**

Coste Tuberías (€): 88146.14  
 Costel amortización (€/año): 10071.47  
 Coste energéticos (€/año): 21269.94  
 Coste total (€/año): 31341.41

**Resultados bomba**

Altura manométrica bomba: 38.14 m  
 Caudal inicio red: 153.8 l/s  
 Rendimiento Bomba: 70 %  
 Potencia absorbida: 117.45 kW

**Resumen de mediciones**

D.Nominal	P.Nominal	Longitud	Coste Uni.	Coste T
110	1	21	14,85	311,85
125	1	231	17,91	4137,21
140	1	448	22,48	10071,04
160	1	203	29,32	5951,96

Continuar

Figura 7: Formulario Resumen de resultados

Archivos - Datos Red - Características Riego - Tuberías - Cálculos - Resultados - Ayuda -

Barras personalizadas

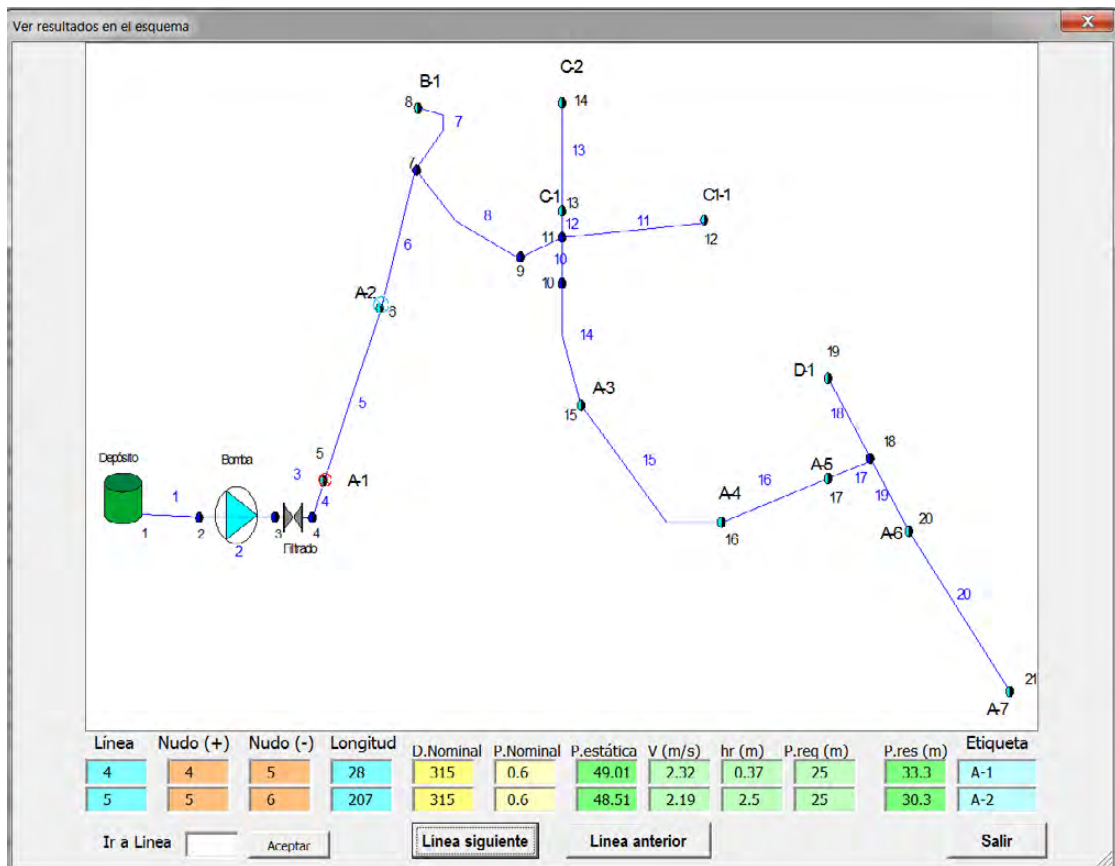
Velocidad (m/s)

	A	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
	Línea	Presión de trabajo (kPa)	Velocidad (m/s)	Pérdida de carga (m)	Pérdida acumulada (m)	Presión estática (m)	Presión resultante (m)	Deficit de presión en nudo (m)	Coste tuberías (€)	Diámetro nominal (mm)	Nudo (+)	Nudo (-)	Etiqueta (m)
11													
12	1	0,60	2,32	0,37	0,37	5,8	5,4	-5,4	2197,44	315	1	2	
13	2		0,00	-38,14		48,9	43,6	-43,6			2	3	Bomba
14	3		0,00	10,00	10,37	48,9	33,6	-33,6			3	4	Filtrado
15	4	0,60	2,32	0,37	10,75	49,0	33,3	-8,3	2197,44	315	4	5	A-1
16	5	0,60	2,19	2,50	13,24	48,5	30,3	-5,3	16245,36	315	5	6	A-2
17	6	0,60	1,86	1,61	14,86	46,7	26,9	-26,9	14283,36	315	6	7	T ramal B
18	7	0,60	0,76	0,29	15,14	45,1	25,0	0,0	3012,45	200	7	8	B-1
19	8	0,60	2,46	3,72	18,58	52,1	28,6	-3,6	9380,30	250	7	9	
20	9	0,60	2,85	1,05	19,63	53,0	28,4	-28,4	1435,32	275	9	10	T ramal C
21	10	1,00	2,44	2,04	21,67	53,9	27,3	-27,3	1729,88	160	10	11	T ramal C
22	11	1,00	1,77	5,63	27,30	60,1	27,8	-2,8	5620,00	140	11	12	C1-1
23	12	1,00	2,30	1,02	22,69	53,9	26,3	1,3	311,85	110	11	13	C-1
24	13	1,00	0,93	1,17	23,86	54,8	26,0	-1,0	2596,95	125	13	14	C-2
25	14	0,60	2,19	2,99	22,62	55,8	28,2	-3,2	4597,95	200	10	15	A-3
26	15	1,00	2,30	4,49	27,11	59,6	27,5	-2,5	6160,26	180	15	16	A-4
27	16	1,00	2,21	4,17	31,28	61,6	25,4	-0,4	4222,08	160	16	17	A-5
28	17	1,00	1,13	0,63	31,91	62,4	25,5	-25,5	3191,46	180	17	18	T Ramal
29	18	1,00	0,62	0,33	32,75	62,3	25,1	-0,1	1540,76	125	18	19	D-1
30	19	1,00	0,83	0,56	32,47	62,9	25,5	0,5	4972,71	180	18	20	A 6
31	20	1,00	0,59	0,62	33,09	63,4	25,4	-0,4	4451,04	140	20	21	A-7

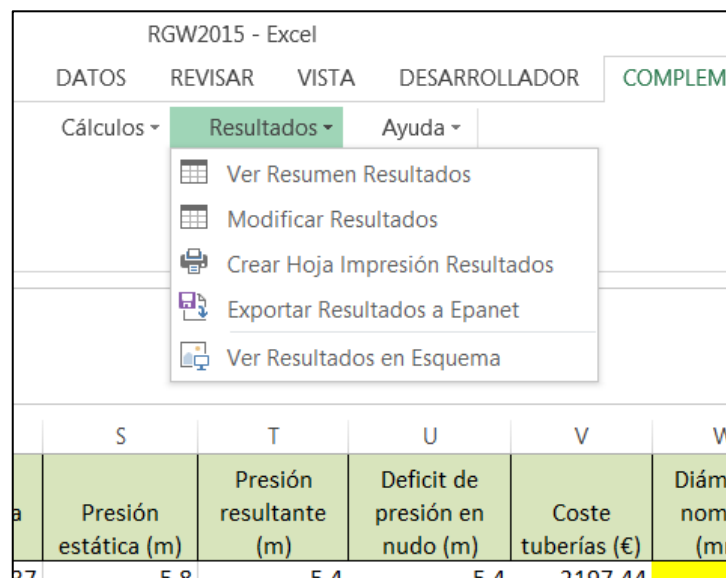
Figura 8: Hoja activa con los resultados del dimensionado

En la Figura 9 aparece el gráfico escalado de la red y los nudos finales de las dos líneas que se visualizan en la parte inferior del formulario aparecen con sendas circunferencias roja y cyan. De esta manera se puede recorrer rápidamente todas las líneas de la red y detectar algún error en la conectividad, caudal o diámetro inadecuado o susceptible de ser modificado.

Desde el menú de resultados (**Figura 10**) una vez comprobado la bondad de éstos, la aplicación permite crear un nuevo libro donde se da formato a toda la información de la red, datos de partida, resultados y mediciones. Pudiendo ser impreso directamente o copiar como tablas a un documento de texto.



**Figura 9:** Resultados sobre el esquema gráfico.

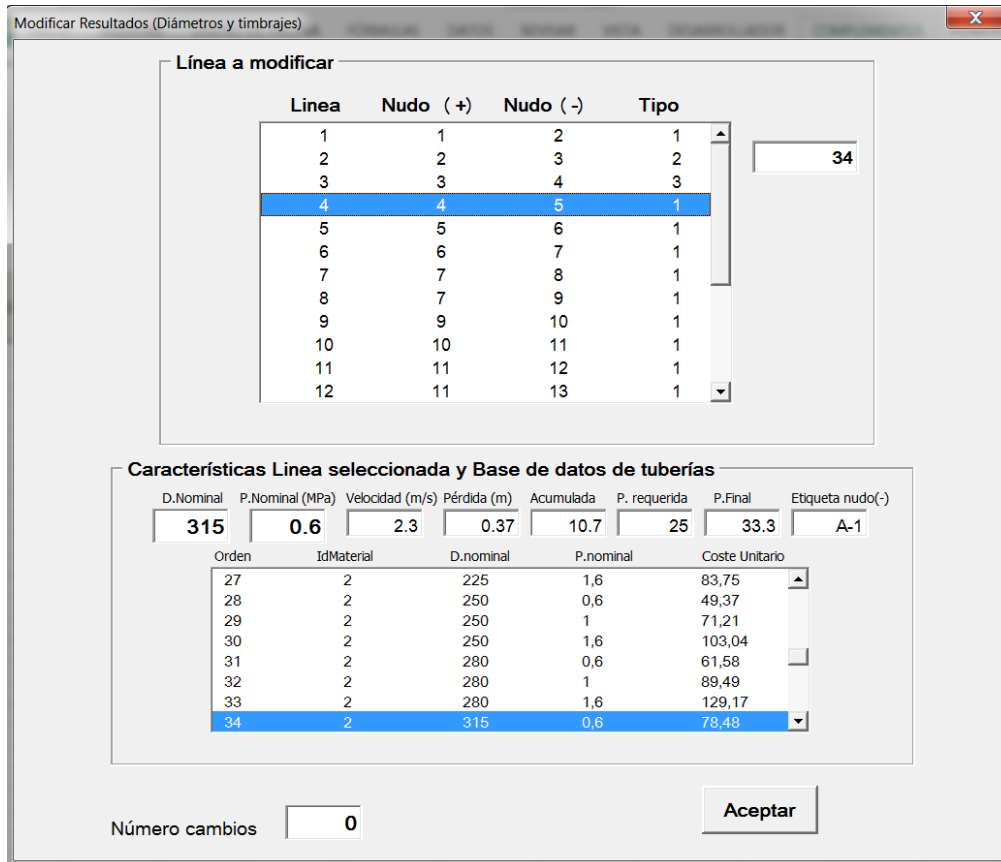


**Figura 10:** Opciones del menú de resultados.



Otra opción de interés es la exportación de resultados para su posterior tratamiento con Epanet y validar la respuesta hidráulica de la red dimensionada bajo distintas hipótesis de funcionamiento.

Los diámetros resultantes del dimensionado pueden ser modificados fácilmente por el usuario accediendo a la opción “Modificar Resultados”



**Línea a modificar**

Línea	Nudo (+)	Nudo (-)	Tipo
1	1	2	1
2	2	3	2
3	3	4	3
4	4	5	1
5	5	6	1
6	6	7	1
7	7	8	1
8	7	9	1
9	9	10	1
10	10	11	1
11	11	12	1
12	11	13	1

34

**Características Línea seleccionada y Base de datos de tuberías**

D.Nominal	P.Nominal (MPa)	Velocidad (m/s)	Pérdida (m)	Acumulada	P. requerida	P.Final	Etiqueta nudo(-)
315	0.6	2.3	0.37	10.7	25	33.3	A-1

Orden	IdMaterial	D.nominal	P.nominal	Coste Unitario
27	2	225	1,6	83,75
28	2	250	0,6	49,37
29	2	250	1	71,21
30	2	250	1,6	103,04
31	2	280	0,6	61,58
32	2	280	1	89,49
33	2	280	1,6	129,17
34	2	315	0,6	78,48

Número cambios: 0 Aceptar

Figura 11: Formulario para la modificación de resultados

#### 4. Conclusiones

La aplicación desarrollada, consideramos, resulta de interés tanto en el ámbito académico como profesional siendo de utilidad tanto en el diseño de redes colectivas de riego a presión como para el caso de redes de distribución para grandes superficies.

El entorno utilizado (Excel) facilita la introducción de datos, manejo de la información e interpretación de resultados. Por otra parte al tratarse de una aplicación de difusión libre está abierta a la introducción de continuas mejoras de las que podrán beneficiar tanto los usuarios actuales como futuros.

Se han dimensionado redes de hasta 500 líneas obteniendo resultados satisfactorios y con reducción del coste total frente a versiones anteriores en un 2-5 %. En cualquier caso esta mejora carece de excesiva trascendencia en tanto en cuanto la red debe ser evaluada y analizada mediante la correspondiente aplicación (Epanet) siendo susceptible de modificación de los resultados obtenidos en primera instancia.



Como mejora inmediata a la aplicación se está desarrollado un entorno gráfico para la introducción de los datos de la red. A su vez los resultados podrán ser exportados a aplicaciones de dibujo técnico (AutoCad o similares)

## 5. Bibliografía

Aliod, R et Al (2011). Nueva herramienta implementada en Gestar 2010 para el dimensionado de tuberías principales en redes de distribución en parcelas y redes de distribución general a turnos. XXX Congreso Nacional de Riegos. Córdoba.

Arviza, J et al. (2007). ASHIDRAR. Un asistente de Cálculo para Problemas de Hidráulica en Riegos a Presión. IV Congreso Nacional de AgroIngeniería (16 p). Albacete (España)

Jiménez Bello, M.A. et Al (2008). Optimización de la sectorización de redes de riego a presión mediante algoritmos genéticos. XXVI Congreso Nacional de Riegos. Huesca

Martínez Alzamora, F & Arviza, (2002) J. DiopCal: Un módulo de Cálculo de uso general para el Dimensionado Económico de Redes de Riego a Presión. XX Congreso Nacional de Riegos. Ciudad Real

Walkenbach, J. (2010) Excel 2010. Programación con VBA. Editorial Anaya. Madrid



## EL RIEGO DE PRECISIÓN EN EL CULTIVO DE FRESA EN LA PROVINCIA DE HUELVA

*Martín Arroyo, M.<sup>1</sup>, Fernández García, I.<sup>1</sup>, Gonzalez Perea, R.<sup>1</sup>, García Morillo, J.<sup>1</sup>,  
Rodríguez Díaz, J.A.<sup>1</sup>, Camacho, E.<sup>1</sup> y Montesinos, P.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Departamento de Agronomía, Área de Ingeniería Hidráulica. Universidad de Córdoba. Campus de Rabanales, Edificio Leonardo Da Vinci, 14071, Córdoba. E-mail: [o2maarm@uco.es](mailto:o2maarm@uco.es), [g52fegai@uco.es](mailto:g52fegai@uco.es), [g72goper@uco.es](mailto:g72goper@uco.es), [g62gamoj@uco.es](mailto:g62gamoj@uco.es), [jarodriguez@uco.es](mailto:jarodriguez@uco.es), [ecamacho@uco.es](mailto:ecamacho@uco.es), [pmontesinos@uco.es](mailto:pmontesinos@uco.es)

### Resumen

El cultivo de fresa es el cultivo con mayor repercusión económica y social de la provincia de Huelva, ya que España es el principal productor de fresa fresca de Europa y el segundo del mundo, situándose el 95% de esa producción en la provincia de Huelva. Sin embargo, la zona donde se desarrolla el cultivo, el entorno del Parque Nacional de Doñana, es una de las zonas de mayor sensibilidad ambiental de Europa y cualquier actividad que se desarrolle debe evitar impactos negativos en el mismo. De lo anterior se deduce la necesidad de buscar un equilibrio para que agricultura y medio ambiente puedan convivir en el entorno de Doñana. Este trabajo se centra precisamente en eso, en optimizar el uso del agua en la zona mediante la implantación del riego de precisión en el cultivo de fresa, que consiste en dar a la planta el agua que necesita en el momento adecuado. La implantación de un sistema de riego de precisión se ha llevado a cabo en la campaña 2013/2014 en una finca comercial de la zona Almonte-El Rocío, provincia de Huelva. Para ello se ha implantado un ensayo en 5 sectores distintos, cada uno con un tipo de emisor diferente, en el que se realizó una programación óptima del riego basada en el cálculo de las necesidades teóricas del cultivo, el análisis hidráulico del sector y el movimiento del agua en el suelo, y cuyo comportamiento se comparó con un sector testigo manejado por el agricultor. Estas técnicas permitieron ahorrar un 43% de agua, en las condiciones particulares de suelo, variedad y configuración de la red riego de la finca de ensayo, obteniéndose un ligero aumento de producción respecto al manejo tradicional del agricultor, lo que se tradujo en un incremento de la rentabilidad del cultivo y de una mejora de la sostenibilidad en la producción intensiva de fresas.

### 1- Introducción, Objetivos

España es el principal productor de fresa (*Fragaria x ananassa*) fresca de Europa y el segundo del mundo, detrás de Estados Unidos, con una producción cercana a las 300000 t/año. De esta producción, el 95% se sitúa en la provincia de Huelva, que se ha convertido en la mayor concentración productora de fresas del mundo.

Por una parte, el cultivo de fresa es el cultivo con mayor repercusión económica y social en la zona, y por otra parte, la zona donde se desarrolla el cultivo, el entorno del Parque Nacional de Doñana, es una de las zonas de mayor sensibilidad ambiental de Europa, siendo el agua el elemento que vincula los ecosistemas (marismas, lagunas) y la economía (fresas, arrozales). La relación del agua con el territorio genera importantes tensiones y problemas ambientales, especialmente en épocas de escasez del recurso, y cualquier actividad que se desarrolle en este entorno debe ser respetuosa con el mismo, ser viable económicamente y tener un impacto social positivo.

Las dotaciones previstas por las administraciones públicas del agua en dicha zona preocupan al sector fresero, por considerarlas insuficientes, y están generando importantes tensiones entre la Administración, los agricultores y el sector medioambiental. De ahí que deba lograrse una dotación consensuada que satisfaga los intereses de las tres partes.

Por otra parte, el diseño de muchas de las instalaciones de riego en fincas comerciales no se ha realizado siguiendo criterios técnicos. Así mismo, los emisores utilizados, cintas de riego, son emisores turbulentos donde el caudal varía con la presión y tienden a obstruirse. Las circunstancias anteriores junto con un manejo del riego por parte del agricultor basado en su experiencia, hace difícil el uso sostenible del agua de riego en el cultivo de fresa en una zona tan sensible ambientalmente como es el entorno de Doñana.

Como alternativa sostenible aparece el riego de precisión, que consiste en dar a la planta el agua que necesita en el momento adecuado. Para ello es necesario conocer tanto los requerimientos de agua del cultivo como el movimiento del agua a través del suelo, muy condicionado por el alto contenido de arena, normalmente superior al 90% en la zona.

El objetivo del presente trabajo es la implantación de un riego de precisión que aplique el agua de forma uniforme en toda la parcela, mediante eventos de riego de duración variable a lo largo de la campaña, de modo que el agua se mantenga en los primeros 40 cm del suelo, evitando la percolación. El tiempo de riego se determina a partir de variables medibles, reduciéndose así la incertidumbre sobre la cantidad de agua aplicada.

## 2- Materiales y métodos

### 2.1. Ensayo de riego de precisión

Una vez establecida la importancia de disponer de un sistema de riego de precisión en el cultivo de la fresa, la metodología propuesta se ha aplicado en un sector de riego de una finca comercial.

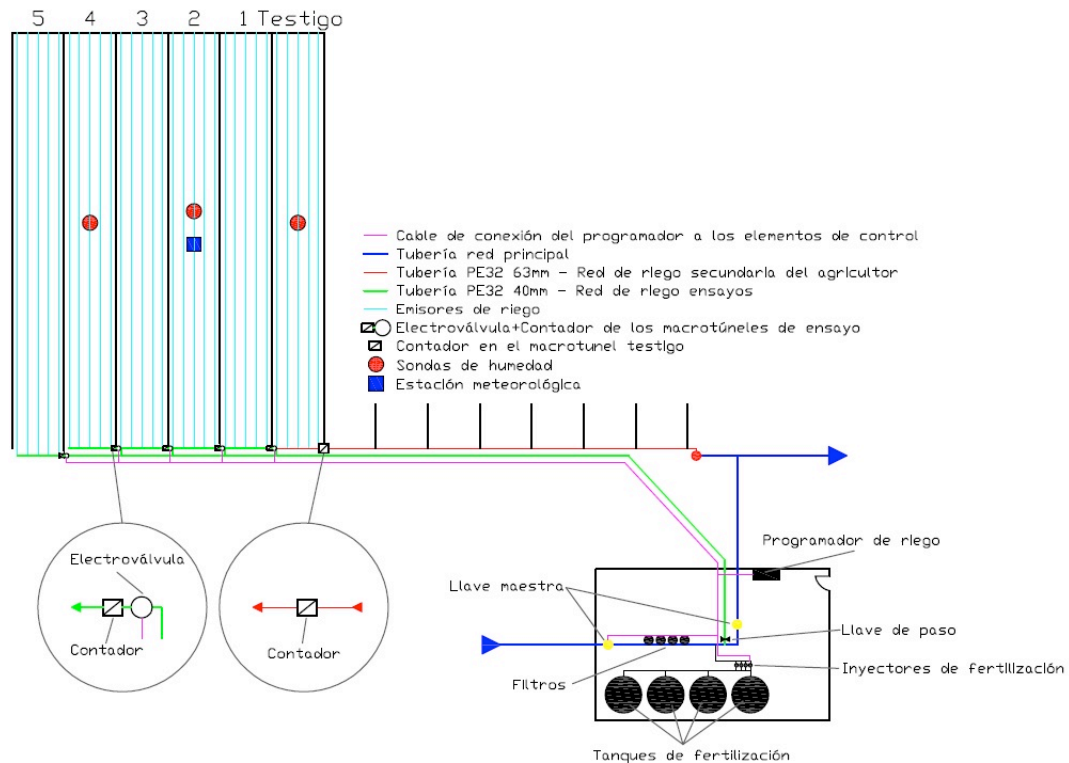
La implantación del sistema de riego de precisión se ha llevado a cabo en la campaña 2013/2014 en una finca comercial de la zona Almonte-El Rocío, provincia de Huelva. La variedad cultivada donde se ha llevado a cabo el ensayo es Splendor, con una densidad de plantación de 65000 plantas/ha, y la textura del suelo es 92% arena, 4% arcilla y 4% limo. La fecha de plantación tuvo lugar el 01/10/2013, la cubrición con plástico se realizó el 03/11/2013, retirándose ese plástico el 16/05/2014 y el final de campaña fue el 27/05/2014.

Se ensayaron cinco emisores de riego diferentes, seleccionados y evaluados previamente en el laboratorio (*Martín Arroyo, M., 2013*), cada uno instalado en un macrotúnel independiente, cuyo comportamiento se comparó con el del agricultor. Cada macrotúnel se manejó como un sector de riego independiente de 255 m<sup>2</sup>, controlado por una electroválvula en cabecera donde se reciben las órdenes del programador de riego. Además cada sector dispone de un contador inteligente, que almacena en su memoria cuando y cuánta agua se consume en cada evento de riego. La dosis de agua aplicada se basa en una programación óptima de riego, basada en el cálculo de las necesidades teóricas del cultivo, el análisis hidráulico del sector mediante el uso del simulador hidráulico Epanet (*Rossmann, 2002*) y el movimiento del agua en el suelo, simulado mediante el modelo Hidrus (*García Morillo, J., 2014*). Para el cálculo de las necesidades teóricas del cultivo se ha instalado una estación agroclimática en la parcela de ensayos, compuesta por dos piranómetros de silicio, uno dentro y otro fuera del macrotúnel, y un sensor de temperatura dentro del túnel; y para monitorizar el movimiento del agua en el suelo se han instalado 3 equipos de monitorización de humedad en el suelo, formado cada uno de ellos por 3 sondas de humedad capacitivas (FDR), instaladas a tres profundidades (12, 25 y 40 cm), y conectadas a un datalogger que registra los datos cada 15 minutos en 3 macrotúneles (testigo, 2 y 4).

Este ensayo se llevó a cabo durante la fase de desarrollo del cultivo, es decir, la fase de riego por goteo, siendo la aplicación de agua en las fases previas de alomado y plantación igual en todos los macrotúneles del ensayo, realizada por el agricultor según su criterio.

Respecto a la fertilización, se aplicó durante toda la campaña el programa de fertilización que seguía el agricultor, realizado un seguimiento de la fertilización aplicada, con el objetivo de calcular las unidades de fertilizante (UF) utilizadas y asegurar que no hay problemas por exceso o defecto de fertilizantes.

El esquema del ensayo de riego de precisión se puede ver en la Figura 1.



**Figura 1.** Esquema ensayo riego de precisión

Un aspecto fundamental al abordar el ensayo, es que el menor uso del agua de riego en ningún caso debe conllevar una pérdida de rentabilidad, por eso, además de medir cuando y cuánta agua se consume en cada uno de los 6 macrotúneles del ensayo, se registró la producción obtenida de primera y segunda categoría e industria, y se realizó un seguimiento de la calidad de la fruta obtenida, midiendo °Brix, pH, acidez, peso por unidad, forma, decoloración cuello, botrytis, sobremaduras, sabor y color visual, en cada uno de los macrotúneles del ensayo.

## 2.2. Programación del riego

Para realizar la programación del riego, en primer lugar se determinaron las necesidades de riego teóricas del cultivo, estimadas a partir de la serie histórica de datos climáticos (ET<sub>o</sub>) registrada en la estación agroclimática de la zona (*Estación Meteorológica de Almonte, 2013*) en las últimas 10 campañas (03/04 – 12/13), y de los coeficientes de cultivo (K<sub>c</sub>) utilizados, que son los propuestos por FAO (*Allen et Al., 2006*) y posteriormente adaptados en el estudio de WWF para el cultivo de la fresa en Huelva (*WWF, 2009*) y en consonancia a los propuestos para la zona (*Verdier, 1987*). En segundo lugar, se determinó el tiempo de riego diario, a partir de las necesidades de riego teóricas del cultivo calculadas

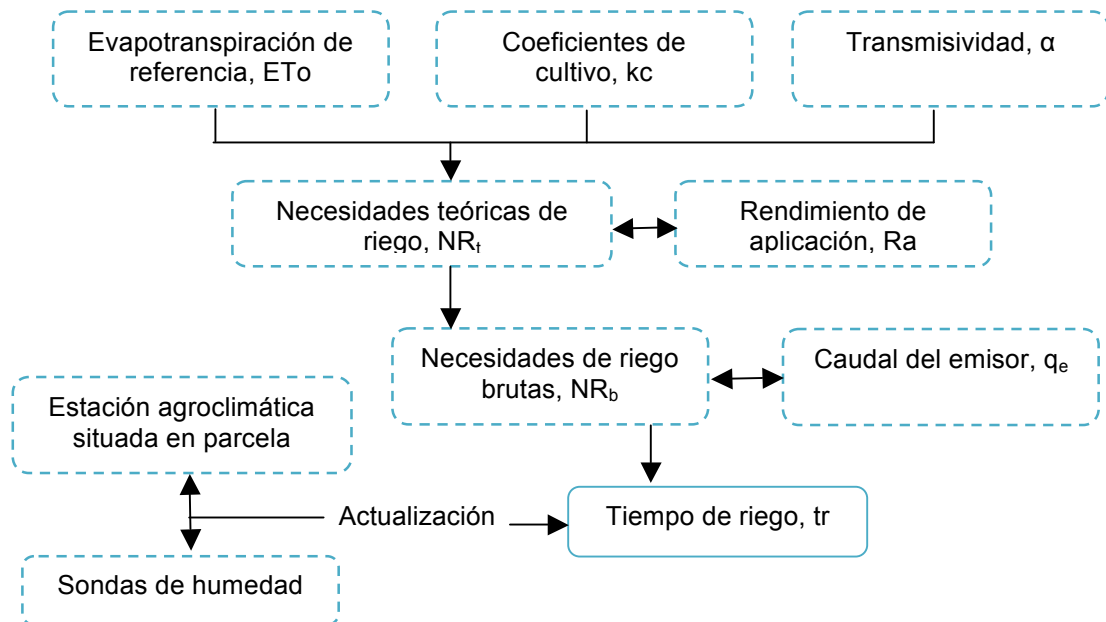
previamente, y del análisis hidráulico del sector realizado con el simulador Epanet (Tabla 1). El tiempo de riego varía en cada sector o macrotúnel, en función del caudal del emisor y de su rendimiento de aplicación ( $R_a$ ), el cual es función de la configuración hidráulica del sistema de riego. De esta forma se obtuvieron los tiempos de riego en minutos/día, repartidos en uno o varios pulsos de riego para minimizar la percolación. El número de pulsos se determinó mediante el modelo Hidrus. Estos tiempos de riego se corregían semanalmente con los datos registrados por una parte, en la estación agroclimática instalada en la parcela de ensayo, y por otra con los datos de sondas de humedad capacitivas (FDR). Por último se estableció una presión en cabeza del sector, resultante del análisis hidráulico (Tabla 1), que permitía trabajar bajo condiciones ideales de funcionamiento.

**Tabla 1.** Parámetros del comportamiento del riego

Túnel	Tipo de emisor	Dato técnico	Caudal unitario ( $l \cdot h^{-1} \cdot m^{-1}$ )	Presión en cabeza (bar)	Caudal del sector (l/h)	$CVq$	$U_s$ (%)	$R_a$ (%)
1	Streamline 16080fl 3.6	C	3,6	0,85	758,96	0,032	96,8	94,3
2	Streamline 16080fl 5.25	C	5,25	0,85	1121,7	0,032	96,8	94,3
3	Dripnet PC 16200	PC	3	0,42	677,91	0,022	97,8	96,2
4	Amnon PC CNL	PC CNL	3,67	1,1	825,62	0,042	95,8	92,7
5	Uniram As 17012	PC AS	5,33	0,65	1205,41	0,022	97,8	96,2

C = Cinta de riego; PC = Autocompensante; PC CNL = Autocompensante y antidrenante; PC AS = Autocompensante y antisucción

El esquema integral de programación del riego se muestra en la Figura 2.



**Figura 2.** Esquema integral de programación del riego

### 2.3. Análisis coste-beneficio

La monitorización tanto del consumo de agua como de la producción permitió realizar un análisis coste-beneficio, en el que se calculó el aumento de rentabilidad en los macrotúneles con riego de precisión respecto al testigo. Para ello se tuvieron en cuenta, por una parte, los costes de producción tanto en el macrotúnel testigo como en los regados



mediante el sistema de precisión, y por otra parte, el aumento de producción asociado a la producción que se obtuvo en los macrotúneles experimentales respecto al testigo. Los costes productivos considerados eran los asociados al sistema de riego, agua, fertilizante, energía en el cabezal de riego y mano de obra requerida para el riego y la fertilización. La estimación del aumento de beneficio logrado en los 5 macrotúneles donde se llevó a cabo el riego de precisión se calculó considerando los incrementos/decrementos mensuales de la producción en relación al testigo. Estos valores multiplicados por los precios medios mensuales menos el coste de recolección (0,4 €/kg), que era el coste que cambiaba entre túneles, proporcionó el aumento de beneficio. Los precios medios mensuales de la campaña fueron: diciembre y enero, 1,93 €/kg; febrero, 1,13 €/kg; marzo, 0,8 €/kg; abril, 0,47 €/kg y mayo, 0,36 €/kg.

### 3- Resultados y discusión

#### 3.1. Necesidades teóricas y brutas de riego

Las necesidades teóricas del cultivo, coinciden con la ETc (m<sup>3</sup>/ha) al no intervenir la lluvia en el balance hídrico, y el consumo de agua en la fase de riego por goteo (m<sup>3</sup>/ha) para los diferentes túneles del ensayo y para los diferentes meses de la campaña aparecen en la Tabla 2.

**Tabla 2.** ETc y Consumo de agua en goteo

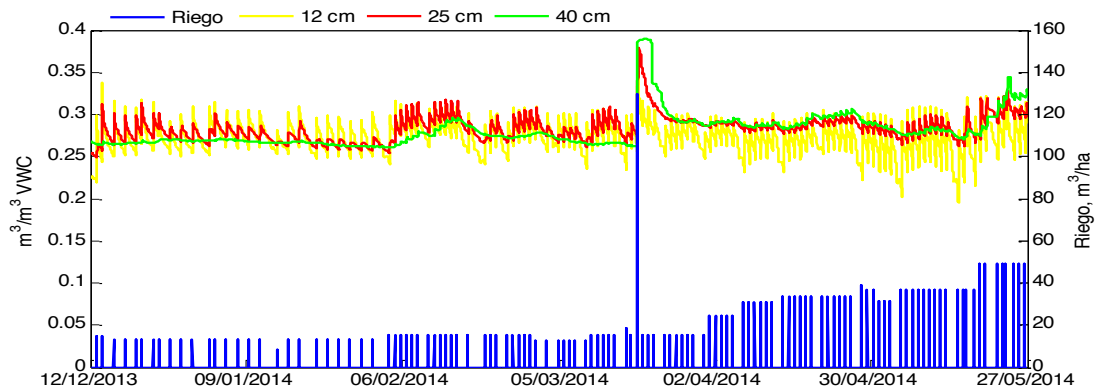
Mes	ETc (m <sup>3</sup> /ha)	Consumo de agua en riego por goteo (m <sup>3</sup> /ha)					
		Túnel 1	Túnel 2	Túnel 3	Túnel 4	Túnel 5	Testigo
Octubre	163,4	173,2	173,2	169,8	176,2	169,8	197,9
Noviembre	247,6	308,0	296,2	274,2	263,0	270,3	565,9
Diciembre	186,7	250,6	234,9	223,2	203,6	211,4	477,7
Enero	156,1	195,8	191,9	188,0	168,4	176,2	379,8
Febrero	279,8	301,5	325,0	325,0	309,3	305,4	536,5
Marzo	450,5	477,7	481,6	540,4	524,7	591,3	873,2
Abril	664,3	787,1	822,3	865,4	716,6	724,4	1210,0
Mayo	911,0	998,5	967,2	1135,6	982,8	1002,4	1879,6
TOTAL	3059,4	3492,4	3492,4	3721,5	3344,6	3451,3	6120,5

El consumo de agua en la fase de riego por goteo en los 5 macrotúneles donde se realizó un riego de precisión varió entre los 3344,6 m<sup>3</sup>/ha del macrotúnel 2 y los 3721,5 m<sup>3</sup>/ha del macrotúnel 3, mientras que el consumo del testigo en el mismo periodo fue de 6120,5 m<sup>3</sup>/ha. Es importante destacar que las necesidades brutas de riego aplicadas en los 5 túneles de ensayo, tan próximas a las necesidades de riego teóricas, se debieron, principalmente al tipo de suelo (>90 % de arena y presencia de una capa de arcilla a 50 cm de la superficie). En otros suelos, con mayores profundidades de la capa de arena, las necesidades brutas de agua aumentan. Así mismo, longitudes de lomo inferiores a 45 m, con pequeñas pérdidas de carga, permiten un buen comportamiento de las cintas de riego (túneles 1 y 2), a pesar de ser emisores no compensantes. El riego de precisión consiguió un ahorro medio de agua del 43% respecto al testigo en los 5 macrotúneles monitorizados. Si se tiene en cuenta el consumo de 657 m<sup>3</sup>/ha registrado en la fase de alomado, y los 603 m<sup>3</sup>/ha en plantación, el consumo total de los 5 túneles de ensayo varió entre 4604,6 m<sup>3</sup>/ha en el macrotúnel 4 y 4981,5 m<sup>3</sup>/ha en el macrotúnel 3, mientras que el consumo total del testigo fue de 7380,5 m<sup>3</sup>/ha.

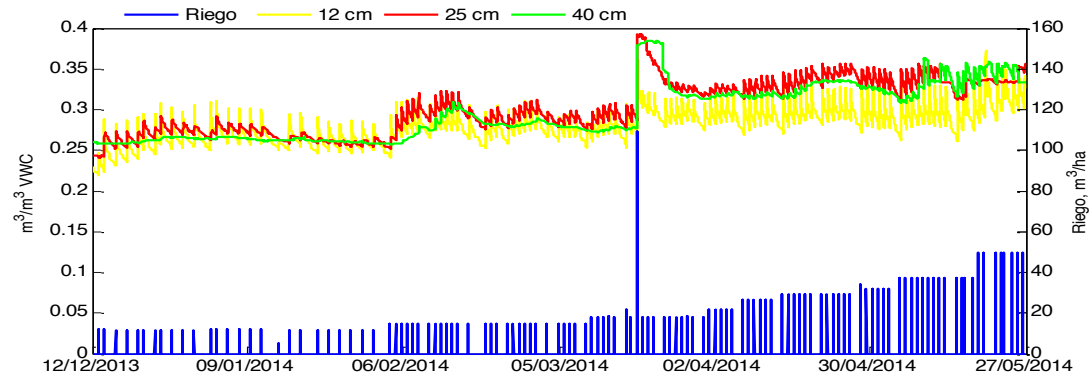
Para la fertilización de los macrotúneles experimentales se siguió el mismo programa de fertilización del agricultor, aplicando la misma solución fertilizante en todos los macrotúneles, para analizar así la influencia del riego de precisión en el proceso de producción de fresa.

Durante toda la campaña se comprobó semanalmente que el programa de fertilización del agricultor no generaba problemas nutricionales en las plantas de los túneles de ensayo.

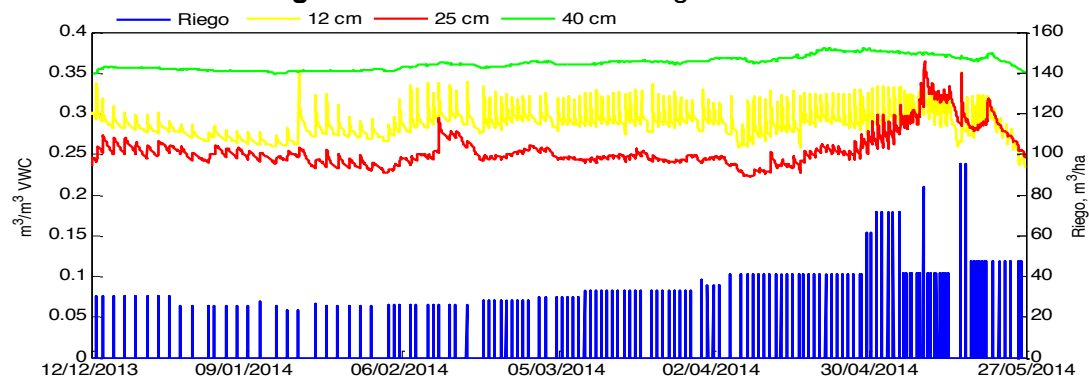
Las Figuras 3, 4 y 5 muestran los resultados obtenidos en la monitorización del riego en los 3 macrotúneles donde estaban instaladas las sondas de humedad, desde el 12/12/2013 (día en que se instalaron las sondas) hasta el 27/05/2014 (final de campaña). Los sensores de humedad están a la profundidad del sistema radicular de la fresa en el periodo inicial (12 cm) y cuando alcanza su máximo desarrollo supera los 25 cm. El tercer sensor se instaló a 40 cm ya que la raíz de este cultivo no suele alcanzar esa profundidad y, por tanto, un contenido de humedad elevado en este nivel indicaría pérdidas por percolación.



**Figura 3.** Monitorización del riego Túnel 2



**Figura 4.** Monitorización del riego Túnel 4



**Figura 5.** Monitorización del riego Túnel testigo

En el macrotúnel 2 y 4 (Figuras 3 y 4), los valores registrados por los sensores de humedad demuestran que la programación del riego ha sido adecuada. El contenido de humedad a 12 y 25 cm se mantiene siempre entre 0,25 y 0,3  $m^3/m^3$  VWC (volumen water

capacity), excepto durante los días posteriores al fallo que se produjo en el programador del riego el 19/03/2014. El contenido de agua a 40 cm se situó en torno a  $0,27 \text{ m}^3/\text{m}^3$  VWC durante toda la campaña hasta el día en el que tuvo lugar el fallo en el programador de riego. A partir de ese día, el contenido de agua alcanzó un valor de  $0,29 \text{ m}^3/\text{m}^3$ , ya que la presencia de una capa de arcilla próxima a la superficie dificultaba el drenaje del terreno. En las últimas fases del cultivo, para evitar percolaciones era recomendable aplicar varios pulsos de riego al día de menos de 30 minutos, lo cual no pudo realizarse por limitaciones técnicas en la finca de ensayos.

Con respecto al macrotúnel testigo (Figura 5), el contenido de agua a 12 cm se mantuvo en torno a  $0,3 \text{ m}^3/\text{m}^3$  durante toda la campaña, excepto en la última semana, donde la retirada del plástico y el aumento de la temperatura dieron lugar a una reducción en el contenido de humedad en el suelo ( $0,25 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ). Por tanto, el comportamiento fue similar al de los túneles 2 y 4. Sin embargo, el contenido de humedad registrado a 25 cm,  $0,25 \text{ m}^3/\text{m}^3$ , fue inferior al obtenido en los túneles experimentales debido al tipo de emisor empleado en esta finca (cinta exudante). A 40 cm, el contenido de humedad se mantuvo siempre por encima de  $0,35 \text{ m}^3/\text{m}^3$ , lo que indica que el suelo se encontraba en condiciones de saturación.

### 3.2. Producción y calidad

Se realizó un seguimiento de la producción obtenida de primera y segunda categoría e industria en cada uno de los macrotúneles del ensayo (Tabla 3).

**Tabla 3.** Producción

Categoría		Producción					
		Túnel 1	Túnel 2	Túnel 3	Túnel 4	Túnel 5	Testigo
Primera	kg/ ha	38027,2	37011,2	38683,0	36552,0	35659,8	36310,2
	g/ planta	585,0	569,4	595,1	562,3	548,6	558,6
Segunda	kg/ ha	2701,9	3034,7	2897,6	2838,9	3093,4	2662,7
	g/ planta	41,6	46,7	44,6	43,7	47,6	41,0
Industria	kg/ ha	11708,0	11629,7	11747,2	11747,2	11668,9	11747,2
	g/ planta	180,1	178,9	180,7	180,7	179,5	180,7
TOTAL	kg/ ha	52437,1	51675,6	53327,8	51138,1	50422,1	50720,1
	g/ planta	806,7	795,0	820,4	786,7	775,7	780,3

La producción total registrada en los 6 macrotúneles, aunque sin diferencias significativas, fue ligeramente superior en los macrotúneles 1, 2, 3 y 4 que la del testigo, mientras que la producción del macrotúnel 5 estuvo ligeramente por debajo. Si esta producción total se estudia por meses, la producción registrada en enero y febrero en los macrotúneles de ensayo fue superior a la registrada en el testigo, es decir, este aumento de producción se produjo en los meses en los que la fresa tiene los precios más elevados. Para el resto de meses (marzo, abril y mayo) la producción en los 6 macrotúneles fue idéntica. Esto se debe, entre otras razones, a que al seguir el mismo programa de fertilización del agricultor, y aplicar las mismas unidades de fertilizante, la planta, en los primeros meses de recolección tenía mayor disponibilidad de nutrientes al no producirse lixiviado de ellos, de ahí que la producción en estos meses fuera mayor que la registrada en el testigo. Respecto a la producción por categoría no hubo ninguna diferencia, siendo el porcentaje de fruta destinado a primera categoría, segunda categoría e industria igual en todos los macrotúneles.

Aparte del registro de la producción, también se llevó un seguimiento de la calidad de la fruta obtenida en los macrotúneles del ensayo, donde se medía °Brix, pH, acidez, peso por unidad, forma, decoloración cuello, botrytis, sobremaduras, sabor y color visual. El

análisis de estos parámetros a largo de la campaña. no mostró diferencias significativas en la calidad de la fruta de los 5 macrotúneles con riego de precisión respecto a la del túnel testigo.

### 3.3. Análisis de coste-beneficio

El análisis de coste-beneficio realizado (Tabla 4) muestra los costes de producción anuales (fijos y variables) en todos los macrotúneles del ensayo, el aumento de beneficio y el aumento de rentabilidad obtenido en los macrotúneles donde se realizó el riego de precisión respecto al macrotúnel testigo.

**Tabla 4.** Análisis costes-beneficio

Tipo de coste	Costes (€·ha <sup>-1</sup> ·año <sup>-1</sup> )					
	Túnel 1	Túnel 2	Túnel 3	Túnel 4	Túnel 5	Testigo
Sistema de riego	399	399	357	453	325	399
Agua	870	870	898	853	865	1186
Fertilizante	1220	1220	1220	1220	1220	1220
Energía cabezal de riego	238	179	258	212	168	203
Mano de obra riego y fertilización	1107	1107	1205	1205	1205	1107
<b>TOTAL COSTES</b>	<b>3835</b>	<b>3776</b>	<b>3937</b>	<b>3942</b>	<b>3783</b>	<b>4115</b>
Aumento de beneficio (€·ha <sup>-1</sup> ·año <sup>-1</sup> )						
Producción	1136	780	545	863	996	0
<b>TOTAL AUMENTO DE INGRESOS</b>	<b>1136</b>	<b>780</b>	<b>545</b>	<b>863</b>	<b>996</b>	<b>0</b>
Aumento de rentabilidad (€·ha <sup>-1</sup> ·año <sup>-1</sup> )						
<b>AUMENTO DE RENTABILIDAD</b>	<b>1416</b>	<b>1119</b>	<b>723</b>	<b>1036</b>	<b>1328</b>	<b>0</b>

Respecto a los costes, tampoco existen diferencias significativas entre los macrotúneles experimentales y el testigo. El coste medio anual asociado a los cinco macrotúneles experimentales fue de 3855 €·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup> y el del testigo 4115 €·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup>, es decir, hubo una reducción media de costes en los macrotúneles donde se aplicó un riego de precisión de 260 €·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup> respecto al testigo. Esta reducción de costes se debió principalmente a la reducción en el consumo de agua. En este ensayo, al utilizar las mismas unidades de fertilizante el menor uso de agua no lleva asociado un menor uso del fertilizante y el coste asociado al fertilizante fue el mismo en todos los macrotúneles, sin embargo, en otras fincas con otras estrategias de fertilización, el menor uso del agua sí lleva asociado la reducción del fertilizante, lo que conllevará un ahorro considerable.

Aunque la producción fue similar en los 6 macrotúneles, los macrotúneles experimentales tuvieron mayor producción a principios de campaña, cuando los precios son generalmente más altos. El incremento medio de beneficio en los 5 macrotúneles experimentales respecto al testigo fue de 864 €·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup>.

Teniendo en cuenta la reducción de costes y el aumento de beneficio que se produjo en el cambio del manejo y/o sistema de riego respecto al del túnel testigo, se obtuvo un aumento de rentabilidad medio de 1124 €·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup> en los 5 macrotúneles experimentales, que extrapolándolo a una finca de tamaño medio en la zona (15 ha) podría suponer un beneficio adicional de 16860 €·año<sup>-1</sup>. Estas estimaciones pueden variar de un año a otro (cambio de variedad, problemas de plagas y enfermedades, situación del mercado, etc...), pero son una referencia a tener en cuenta.

## 4- Conclusiones y recomendaciones

La disminución de la disponibilidad de agua y el impacto ambiental de la producción intensiva de fresas, ligados a la variabilidad del mercado están forzando al sector fresero a



realizar un uso eficiente de los recursos. Su futuro va a depender, en gran medida, de la implantación de sistemas de riego de precisión en las fincas de cultivo, que permitan una utilización más eficiente de recursos como el agua, energía o fertilizante. No obstante, estos sistemas deben permitir mantener los niveles de producción utilizando menos recursos productivos, mejorando de esta forma la rentabilidad de las explotaciones y minimizando el impacto ambiental de esta actividad al disminuir la aportación de elementos contaminantes al acuífero subyacente. Un manejo preciso del riego determina el momento, la frecuencia y el tiempo de riego adecuados según las características del cultivo, red de riego, clima y suelo. La implantación de sistemas de riego de precisión es fundamental para garantizar un uso sostenible del agua.

Este trabajo muestra que gracias a la implantación de un riego de precisión se ha reducido el consumo de agua un 43% de agua, en una explotación comercial, dadas sus características específicas (variedad, suelo, topología de la red, etc..) aumentando la rentabilidad del cultivo y mejorando su sostenibilidad.

En la presente campaña 2014/2015, se continúa realizando ensayos de riego de precisión en fincas comerciales con diferentes características (suelo, variedades y configuraciones de la red de riego, entre otros aspectos) y se está asesorando en la gestión del riego, implementando este sistema de riego en cerca de 1500 ha de fresa (23% de la superficie total de fresa), de forma particularizada para cada finca.

## 5- Agradecimientos

El ensayo del sistema de riego de precisión se ha desarrollado en el marco del proyecto “*Reducing the hydrological impact of the imported strawberries – Huelva región of Spain*”, financiado por la Fundación Coca-Cola.

## 6- Bibliografía

- Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes D.; Smith, M. (2006). Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y drenaje 56.
- Bralts, V.F. and Kesner, C.D. (1983). Drip irrigation Field Uniformity Estimation. Transactions of the Amer. Soc. Ag. Eng. 26(5):1369-1374.
- Fundación Doñana 21. (2006). Manual de Buenas Prácticas Agrarias Sostenibles. In: De la Agricultura al desarrollo Rural Sostenible, Available at <http://www.donana.es/wp-content/uploads/2013/01/Manual-Buenas-practicas-agrarias-sostenibles.pdf>.
- J. García, M. Martín, E. Camacho, J.A. y P. Montesinos. (2014). Hacia el riego de precisión en el cultivo de la fresa. I Symposium Nacional de Ingeniería Hortícola. La agromótica en la Horticultura. Orihuela (Alicante). SECH.
- Junta de Andalucía. (2013). Estación Meteorológica de Almonte. [http://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/ifapa/ria/servlet/FrontController?accion=Static&url=coordenadas.jsp&c\\_provincia=21&c\\_estacion=10](http://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/ifapa/ria/servlet/FrontController?accion=Static&url=coordenadas.jsp&c_provincia=21&c_estacion=10)
- Martín Arroyo, M., Montesinos, P., García Morillo, J., Rodríguez Díaz, JA., Camacho, E. (2013). Influencia de los emisores de riego en la sostenibilidad del uso del agua en el entorno del Parque Natural de Doñana. Actas del XXI congreso nacional de riegos. Orihuela (Alicante). C-13.
- Martín Arroyo, M., (2013). Influencia del Riego en la Sostenibilidad del Uso del Agua en el Cultivo de la Fresa en el Entorno del Parque Nacional de Doñana. (Influence of



irrigation on water use sustainability in strawberry cultivation in the surroundings of Doñana National Park). Degree dissertation. UCO.

Martín Arroyo, M., Fernández García, I., González Perea, R., García Morillo, J., Rodríguez Díaz, J.A., Berbel, J., Camacho, E., Montesinos, P. (2014). Fundamentos del riego de la fresa en la provincia de Huelva. <http://riegofresacocacola@blogspot.com.es>

Rossman, L.A. (2002). "EPANET: User Manual. Risk Reduction Engineering Laboratory Office of Research and Development". United States Environmental Protection Agency. Cincinnati, OH.

WWF. (2009). Manual de buenas prácticas de riego. Propuestas de WWF para un uso eficiente del agua en la agricultura. Viñedo, Olivar, Cítricos y Fresa. Madrid. Spain.



# TUBERIAS de PVC ORIENTADO: EFICIENCIA, AHORRO ENERGÉTICO y SOSTENIBILIDAD

*Martínez del Amo, Y (1) (P), Romero Montoya, M (2)*

<sup>1</sup> Director Calidad y Producto, Molecor Tecnología, S.L., [yolanda.martinez@molecor.com](mailto:yolanda.martinez@molecor.com)

<sup>2</sup> Técnico Infraestructuras Hidráulicas, Molecor Tecnología, S.L., [manel.romero@molecor.com](mailto:manel.romero@molecor.com)

## Resumen

Ante la problemática del calentamiento global que sufre el planeta, muchas administraciones y gestoras de agua, están planeando el uso de materiales comprometidos con el medioambiente, buscando soluciones ecológicas y favorables con el desarrollo sostenible del planeta. Las tuberías molecularmente orientadas (PVC-O), se utilizan cada vez con más frecuencia en obras de canalizaciones de agua a presión, por ser la solución actual de mayor eficiencia en la gestión de recursos hidráulicos que demandan las infraestructuras modernas. La confianza en el uso mundial de este tipo de tuberías, se debe, a sus excepcionales propiedades físico-mecánicas perdurables en el tiempo, así como a su inalterabilidad química, ambos indicadores ampliamente ventajosos respecto a las canalizaciones tradicionales. A esto hay que unir, su compromiso con el medio ambiente, siendo la tubería más ecológica del mercado por la menor huella ambiental que presentan.

## 1- Introducción

Los factores que determinan la eficiencia energética durante todo el ciclo de vida de una tubería son principalmente, el tipo de materia prima utilizada, el proceso de producción, el acabado del producto y su vida útil.

Las tuberías de PVC Orientado, evitan el consumo innecesario de energía a lo largo de toda su larga vida útil, ya que analizados todos sus parámetros, ofrece mejores resultados respecto al resto de materiales, siendo esto confirmado por estudios y modelizaciones de prestigio internacional.

Según el informe de la Comisión Europea (Abril 2004) *“Life Cycle Assessment (LCA) of PVC and of principal competing materials”*, el ciclo de vida para los estos productos, incluida la tubería orientada, es el mostrado en la figura 1.



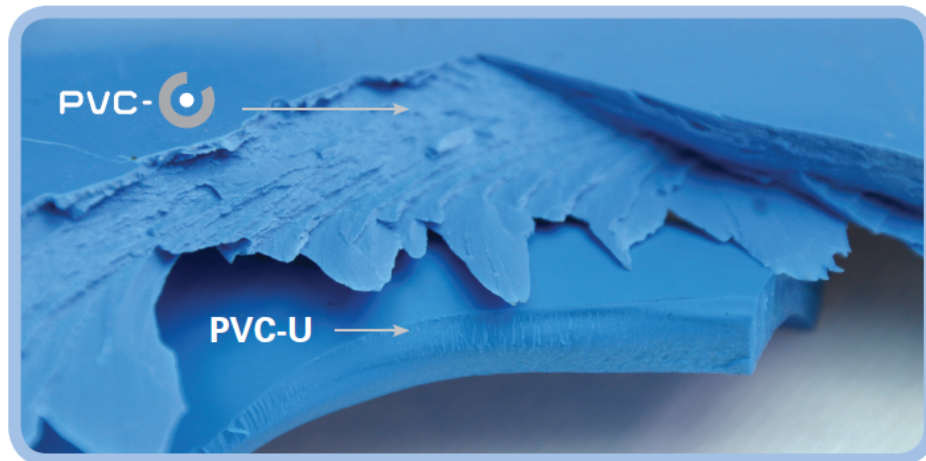
**Figura 1.** Ciclo de vida de las tuberías de PVC-O

Siguiendo el esquema del proceso descriptivo, se muestran la eficiencia, el ahorro energético y la sostenibilidad en todas las etapas de su ciclo de vida.

- Fase producción.
- Fase de uso.
- Fase de reciclaje o disposición final.

## 2- Eficiencia en materias primas y en el proceso productivo

Las tuberías de PVC-O son fabricadas por extrusión convencional y posteriormente sometidas a un proceso de orientación molecular. El tubo base extruido, bajo unas determinadas condiciones de temperatura y presión, es sometido a un estiramiento que produce en el interior de la tubería la reordenación de las moléculas del polímero, formando una estructura laminar (figura 2), que mejora de forma significativa las propiedades mecánicas del producto, a la vez que mantiene intactas sus propiedades químicas.



**Figura 2** Estructura laminar del PVC-O vs estructura amorfa del PVC convencional

Al mismo tiempo que se obtiene esta mejora de propiedades, tiene lugar una optimización del espesor de la pared del tubo. Así racionalizando el uso de materias primas, a la vez que consiguen tubos de mejores prestaciones, se produce una mayor eficacia en el uso de los recursos.

Este menor consumo de materias primas, se traduce en ahorro de energía durante la extracción de las mismas y la producción del material.

## 3- Eficiencia durante el uso

La vida útil de una tubería para el transporte de agua debe garantizar un periodo de 50 años, según establecen las curvas de regresión que determinan su tensión máxima de diseño, pero puede confirmarse que instalaciones en uso de tuberías plásticas analizadas y ensayadas bajo el rigor de las exigencias normativas actuales, prevé un servicio en explotación superior a 100 años para esta modalidad de canalizaciones de nueva generación. Esta vida útil, comienza en el momento de la construcción de la red con la instalación de la tubería. En esta fase, el consumo de energía más importante se debe al bombeo.

Al respecto de la eficiencia y el ahorro energético que tiene lugar durante esta etapa, se pueden diferenciar varios aspectos:

- **Optimización del transporte**

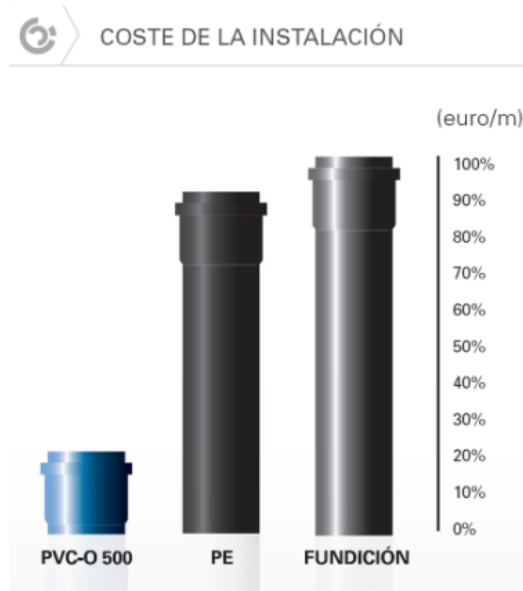
Gracias a su ligereza, podemos transportar más cantidad de material, por tanto tenemos ahorro de combustible y minimización de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

- **Eficiencia en costes de instalación**

- Su ligereza también minimiza la repercusión de la mano obra y la necesidad de maquinaria especial para su puesta en obra.
- El eficaz diseño de la copa permite que los tubos sean ensamblados con gran facilidad.

Uniendo estos dos factores, se consigue un rendimiento de instalación muy alto, reduciéndose de forma considerable los tiempos de ejecución de las obras, obteniéndose beneficios económicos y sociales.

Teniendo en cuenta también, que el coste de la tubería ofrece ventajas competitivas, cuando es comparado con otros materiales, el coste total de la conducción puede verse reducido sensiblemente, según el material y los diámetros a instalar, con la consiguiente optimización de recursos económicos que pueden ser destinados a la construcción de nuevas instalaciones (figura 3).

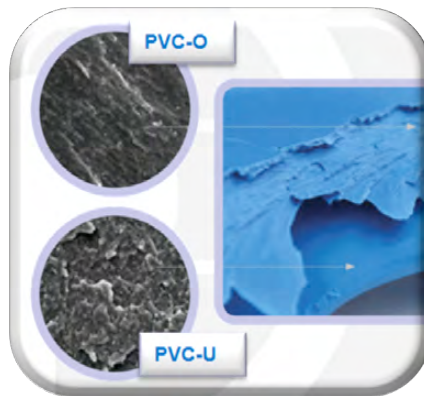


**Figura 3** Gráfico costes de instalación de los distintos tipos de tuberías

- **Eficiencia durante el funcionamiento**

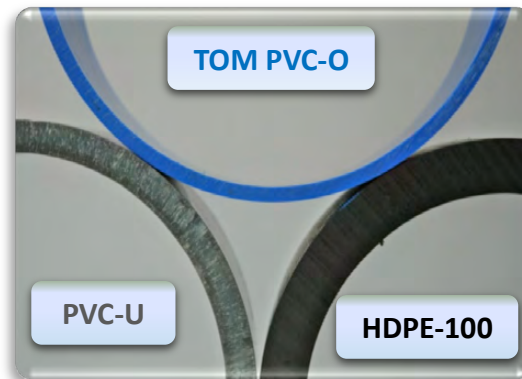
Este tipo de tuberías, presentan una mayor capacidad hidráulica, de hasta el 40%, dependiendo del material y el diámetro con que se comparen, con lo que para un mismo consumo energético, siempre la cantidad de agua transportada es mayor.

La extremada lisura de esta superficie interior (figura 4), hace que la formación de depósitos sea difícil, por lo que el diámetro interior apenas se ve reducido a lo largo del tiempo y así el caudal del fluido para el que la tubería ha sido diseñada se mantendrá invariable durante su utilización.



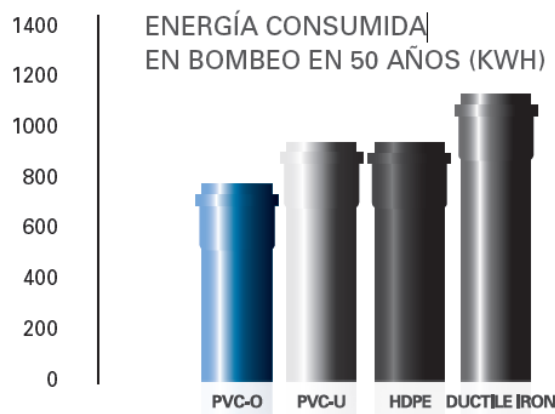
**Figura 4** Rugosidad PVC-O vs PVC-U

Este aumento de capacidad hidráulica se debe a su mayor sección útil (figura 5), ventaja debida a las propiedades que presentan las canalizaciones molecularmente orientadas. Por otra parte, su menor rugosidad hace que la superficie interna del tubo sea extremadamente lisa, con lo que se minimizan las pérdidas de carga y el fluido puede circular a mayor velocidad.



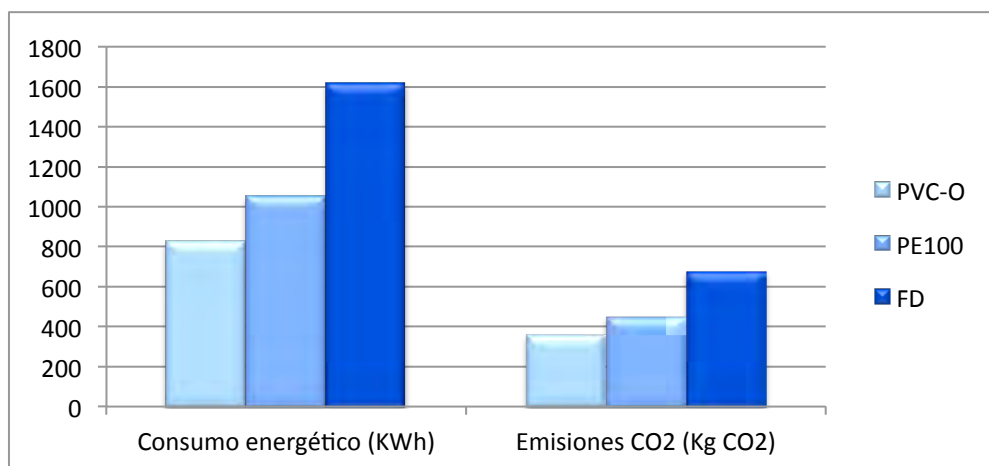
**Figura 5** Comparativa de espesores

Todos estos beneficios hacen que para transportar la misma cantidad de agua, se necesite menos energía, de esta forma, se reducen los consumos energéticos en el bombeo durante la etapa de uso (figura 6).



**Figura 6** Gráfico energía consumida durante la fase de bombeo de distintos materiales

En el caso de las tuberías de PVC-O, según el estudio *“Estimación del consumo energético y de la emisión de CO<sub>2</sub> asociada a la producción, uso y disposición final de tuberías de PVC, PEHD, PP, Fundición y Hormigón”* realizado por la Universidad Politécnica de Catalunya (figura 7), se obtiene el mejor comportamiento tanto en el menor consumo energético, como en la menor emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, por lo que su contribución al efecto invernadero es menor. Todo esto hace que, las tuberías de PVC-O sean la solución más ecológica debido a su mejor contribución al correcto desarrollo sostenible del planeta.



**Figura 7** Gráfico energía consumida y emisiones de CO<sub>2</sub> durante todo el ciclo de vida de un sistema de tubería

- **Elevada vida útil**

La estructura laminar obtenida durante el proceso de orientación molecular que tiene lugar en el proceso de su fabricación, confiere a las tuberías de PVC-O una mejora significativa de sus propiedades mecánicas (figura 8), resultando una canalización con una gran resistencia al impacto y a cargas externas, mejorando su resistencia a tracción y eliminando el riesgo de una propagación de fisura rápida debido a su morfología ordenada.



**Figura 8** Comparativa propiedades mecánicas del PVC-o vs al PVC-U

Gracias a estas excelentes propiedades mecánicas, la tubería es altamente resistente y permanece inalterada durante años, con lo que se minimizan de forma

significativa, las sustituciones de tuberías dañadas o deterioradas en la red con el consiguiente ahorro de recursos humanos y económicos.

## 5- Eficiencia en la gestión de residuos

El PVC es un material 100% reciclable, puede ser reutilizado tras una larga vida de servicio y mediante un proceso de bajo coste, mayoritariamente mecánico. El proceso de fabricación de las tuberías molecularmente orientadas, por su alto requerimiento técnico, no permite la utilización de materiales reciclados, pero permiten un proceso de gestión integral, ya que puede ser utilizadas, tras su ciclo de vida, en la fabricación de otras aplicaciones plásticas, como el recubrimiento de cables o la producción de bajantes para evacuación, donde los requerimientos técnicos exigidos a la materia prima son menores.

De esta forma, se reduce el consumo de materias primas vírgenes y también el volumen de los residuos generados.

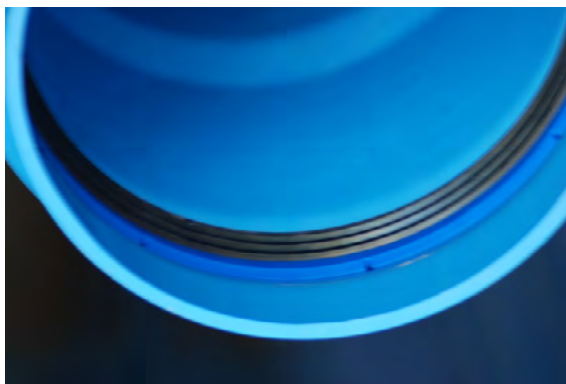
El fomento de una cultura de reutilización y reciclaje, queda reflejado en el informe de la Comisión Europea de Abril 2004 y del compromiso voluntario de los actores del sector en la gestión de los residuos a nivel Europeo en sus programas Vinyl2010 y VinylPlus.

## 6- Optimización de recursos hídricos

Las redes de suministro de agua fabricadas con materiales tradicionales, registran actualmente, un elevado porcentaje de fugas del agua canalizada, debido tanto a la falta de estanqueidad de las uniones, como a las roturas producidas por el deterioro de los tubos. En muchos casos, esto lleva a que las canalizaciones tengan que ser reemplazadas pocos años después de ser instaladas.

Las tuberías orientadas, se presentan como una garantía de durabilidad y compromiso para la conservación de los recursos hídricos aportando soluciones a infraestructuras en equilibrio con los ecosistemas. Los parámetros que contribuyen a su valoración ecopositiva son:

- La completa fiabilidad de las uniones, gracias a una junta elástica de alta calidad y a un eficaz diseño de la copa, que asegura la completa estanqueidad de la conducción, evitando fugas del agua canalizada.



**Figura 9** Detalle de la junta de estanqueidad de una tubería TOM© de PVC-O

- La inercia química del PVC que hace que las tuberías permanezcan inalteradas durante toda su vida útil. De esta forma:
  - Es inerte a fenómenos cinéticos de corrosión electroquímica, bacteriana, fisurante y por fatiga, que producen los componentes del suelo natural. Por lo que:



- No hay que preocuparse por la naturaleza del suelo donde vayan a ser enterradas las tuberías.
- No se necesitan recubrimientos de protección, ni exteriores ni interiores.
- La tubería al no ser afectada por la corrosión, evita la cesión de óxidos y metales al agua, que en caso de agua potable, pueden llegar a suponer un problema de salud pública si se superan los parámetros de calidad exigidos para el agua de consumo humano.
- Es muy resistente frente a una amplia variedad de productos químicos, como desinfectantes o productos fitosanitarios, utilizados en los distintos sectores.
- Es resistente a los biocidas, oxidantes presentes de forma habitual en aguas potables y en los procesos de erradicación de flora y faunas invasoras, sin alterar sus propiedades.
- Su alta resistencia química hace que no se produzca deterioro de la pared del tubo, que en otros materiales puede ocasionar agujeros y fisuras que permitan la introducción de agentes externos en el caudal del agua transportada provocando su contaminación.
- No favorece el crecimiento de microorganismos.

## 9- Conclusiones

Gracias a la orientación molecular, las tuberías de PVC-O presentan ventajas aplicables tanto a la calidad del producto y a sus propiedades mecánicas, como al mayor rendimiento de instalación, así se consigue una eficiencia en costes en la ejecución de las redes de riego.

No menos importante es su mejor contribución, durante todo su largo ciclo de vida, al correcto desarrollo sostenible del planeta y a la optimización del consumo de recursos naturales.

- **Eficiencia**
  - Menor consumo de materias primas: Petróleo y PVC
  - Menos residuos y además 100% reciclable
  - Larga vida útil
- **Ahorro**
  - Menor consumo de energía a lo largo de todo su ciclo de vida: fabricación, transporte, instalación, uso (bombeo) y disposición final
  - Optimización de recursos hídricos
- **Sostenibilidad**
  - Mejor huella ambiental que otros materiales tradicionales
  - Menor contribución al calentamiento global



## RESULTADOS PRELIMINARES EN LOS ESTUDIOS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA DENTRO DEL PROYECTO I+D+i OPTIREG: GESTIÓN EFICIENTE DE REGADÍOS

*Naranjo Hernández, D<sup>1</sup>.*, *Colom Delgado, S<sup>2</sup>.*, *Blanco Redondo, JC<sup>3</sup>.*, *González Muñoz LG<sup>4</sup>.*, *Iglesias Gómez, S<sup>5</sup>.*

<sup>1</sup> Responsable técnico de proyecto OPTIREG1316, Gerencia de Arquitectura e Ingeniería (Tragsatec), Julián Camarillo 6, 28037 Madrid, [dnh@tragsa.es](mailto:dnh@tragsa.es)

<sup>2</sup> Responsable técnico de proyecto OPTIREG1316, Gerencia de Arquitectura e Ingeniería (Tragsatec), Cobalto 3, 47012 Valladolid, [scd@tragsa.es](mailto:scd@tragsa.es)

<sup>3</sup> Responsable técnico de proyecto OPTIREG1316, Gerencia de Arquitectura e Ingeniería (Tragsatec), Cobalto 3, 47012 Valladolid, [jblanco6@tragsa.es](mailto:jblanco6@tragsa.es)

<sup>4</sup> Responsable técnico de proyecto OPTIREG1316, Departamento de Obras y Servicios (Tragsa), Cruz Roja de León 26, 24008 León, [lgonzal2@tragsa.es](mailto:lgonzal2@tragsa.es)

<sup>5</sup> Responsable de apoyo y supervisión de proyecto OPTIREG1316. Subdirección de I+D+i (Tragsa), Conde Peñalver 84, Madrid, [siglesia@tragsa.es](mailto:siglesia@tragsa.es)

### Resumen

El grupo de trabajo WP3 “*Eficiencia energética*” en el marco del proyecto I+D+i OPTIREG “*Gestión Eficiente de Regadíos*” del grupo Tragsa, lleva a cabo diversas actuaciones encaminadas a conocer el estado energético y organizativo de la gestión de las CC.RR. modernizadas, buscando metodologías que mejoren las herramientas de diagnóstico de la situación hídrico-energética de una C.RR., como también estrategias operativas que mejoren la eficiencia energética adaptándose a la idiosincrasia y condición de cada caso particular. Para alcanzar estos objetivos, los trabajos se están centrando en varios aspectos:

- Recopilación de medidas efectivas de eficiencia energética aplicadas a los diversos ámbitos de la infraestructura y organización en que se diversifica una C.RR.
- Caracterización de CC.RR. de Castilla y León con indicadores conocidos y nuevas propuestas de los mismos (benchmarking).
- Evaluación de los rendimientos de la EB mediante el estudio de las curvas globales H-Q, P-Q y Rto-Q.
- Estudio de curvas de frecuencia de caudales.
- Elaboración y calibración de modelos hidráulicos de EB y red de riego en dos zonas piloto para análisis de escenarios simulados con fines a valorar nuevas estrategias de gestión que mejoren la eficiencia energética sin que se vea mermada la calidad del servicio (presión y caudal en el hidrante), ni aumenten el coste energético anual.
- Pasarela de comunicación entre el programa de gestión de riegos Progar y Telegestar.

### 1- Introducción

Las políticas tanto de nuevos regadíos como de modernizaciones y consolidaciones de los ya existentes llevadas a cabo en las últimas décadas a través de diversas actuaciones de ámbito tanto estatal como autonómico (Plan Nacional de Regadíos, Plan de Choque, Estrategia para la Modernización Sostenible de los Regadíos, Planes de Cuenca,...) si bien están afrontando con éxito el reto de optimizar el uso del agua (eficiencia hídrica), en el sentido de disminuir los volúmenes transportados, servidos y consumidos (objetivo preferente de los planes y programas ejecutados, entre otros beneficios asociados como son

la vertebración del territorio y la dinamización del sector agrario,) por medio de la implantación de sistemas de riego más eficientes en su manejo y aplicación del recurso y de la mejora de las infraestructuras de transporte y distribución de agua, llevan asociados una alta demanda energética al pasar del riego tradicional por superficie (canteros, inundación, surcos...) suministrado por un sistema de canales y acequias que trabajan con un flujo en lámina libre a un riego a presión (aspersión y goteo principalmente) abastecido por una red de distribución colectiva de tuberías presurizadas enterradas, sistemas que requieren de importantes cantidades de energía eléctrica para su funcionamiento cuando por condiciones de la topografía del terreno (cotas de las zonas de consumo mayor respecto a la cota del punto de captación) o por el origen del agua de riego (subterráneo y/o superficial) no es posible realizar un aprovechamiento racional de la energía gravitatoria disponible en la naturaleza y es necesario recurrir a grupos de bombeo.

En una visión global, se constata en muchos regadíos una alta dependencia energética cuyo coste asociado presenta una tendencia al crecimiento debido a escenarios de uso de las infraestructuras y adopción de esquemas de operación distintos o alejados a los criterios de diseño y/o manejo de proyecto en que la rentabilidad económica quedaba justificada: cambios de las superficies regadas o del sistema de riego en parcela con otras necesidades de presión/caudal y requerimientos energéticos; modificación de los cultivos de la alternativa con otras exigencias hídricas; reforma del sistema de tarifas eléctricas con distintas franjas horarias; deficiencias arrastradas de un dimensionamiento hidráulico inadecuado de las instalaciones (por infra o sobredimensionado) o en el que se ha dado una concepción pobre de la estructura de la red; deficiente o incompleta gestión que tenga en cuenta el binomio agua-energía tanto en su uso como en su contratación; envejecimiento prematuro de las instalaciones por un mantenimiento insuficiente; funcionamiento de los equipos de bombeo alejados de su rendimiento máximo; y un aumento progresivo de los precios de las tarifas eléctricas. Es decir, que en conjunto, se esté operando en puntos alejados de las previsiones iniciales, pudiendo dejar en entredicho el tecnificado regadío español.

Además, la mayoría de los grandes proyectos de intervención pública han venido acompañados de la incorporación de una abundante tecnología, automatismos e instrumentación (telecontrol, sistemas SCADAs, sensores, PLCs, variadores de frecuencia, arrancadores electrónicos, sistemas redundantes de vigilancia y control, programas informáticos específicos para la gestión de los riegos...) al objeto de facilitar el manejo de la infraestructura y la gestión del agua, quedando a veces obsoleta, relegada al abandono o infrutilizada debido a una falta de mantenimiento, a la complejidad y dificultada de su implantación y uso, a una nula o escasa preparación técnica del personal que tiene que manejarla, al limitado seguimiento de los Organismos públicos que han promovido las obras, o a un uso ineficiente o incompleto con respecto a las posibilidades con las que están dotadas, si bien es cierto que hay muchas Comunidades de Regantes (en adelante CC.RR.) que han sabido adaptarse al cambio y sí que están gestionando y manejando sus instalaciones de una forma racional y eficiente, alcanzando niveles óptimos de control con los avances tecnológicos incorporados, ya sea con personal propio o a través de servicios contratados a terceros.

En lo que respecta a las operaciones de explotación de todo el sistema (red de riego, estación de bombeo – en adelante EB –, balsas, filtros generales, edificaciones, arquetas...) entendida como el conjunto de tareas, procesos y operaciones interdependientes entre sí más o menos complejos: peticiones y ejecución del riego, control del consumo de agua, contratación de la potencia eléctrica, restricciones horarias de uso de los equipos de bombeo, garantizar con calidad el servicio (principalmente asegurar la presión y caudal requerido en los puntos de consumo), facturación, mantenimiento, manejo de situaciones no previstas como restricciones de agua por sequías o interrupciones temporales del servicio por fallos...se verifica en algunos casos dificultades o ineficacias en las operaciones de

gestión hídrica/energética o que éstas no son realizadas de forma eficiente, correctamente o de forma completa con respecto al aprovechamiento potencial con que podrían llevarse a cabo. Además, se confirma que en algunas instalaciones en las que existe la posibilidad de obtener registros históricos de parámetros hidráulicos y energéticos, no se efectúa un análisis o un seguimiento de éstos con fines a conocer el comportamiento real de la instalación con vistas a parametrizar la gestión, el funcionamiento de los equipos, detectar disfuncionalidades o proponer ajustes o formas más eficientes y óptimas de gestión/operación/regulación.

Finalmente, se contrasta que existe una amplia variabilidad de tipología de CC.RR. por diferentes motivos (sistemas de riego en parcela, topografía de la zona, procedencia del agua, cultivos implantados, costumbres, uso de la tecnología implantada, organización y tamaño de la propiedad...), por lo que todo intento de modelizar un sistema de gestión único (enfocado a mejorar la eficiencia energética e hídrica) y para todas las tipologías de CC.RR. estará condenado al fracaso.

Con todo, las posibilidades de mejorar la eficiencia energética e hídrica desde varias estrategias, y así atenuar los costes energéticos asociados, tanto en regadíos que poseen alta tecnología como en aquellos más precarios y según las tipologías variadas de CC.RR. son muy amplias.

## 2- Objetivos del proyecto

El Grupo Tragsa, como conecedor del sector por su larga trayectoria tanto por las obras de regadío que lleva ejecutando en todo el territorio nacional como por su labor en la redacción de proyectos y por las encomiendas de gestión y/o mantenimiento de varias zonas regables, consciente de la necesidad de analizar y mejorar los modelos actuales de gestión y explotación de las infraestructuras de regadío de una forma óptima y sostenible de los recursos, en especial de la energía, apuesta por dar soluciones ante las diversas realidades existentes en el regadío a través de la aplicación e incorporación de innovaciones tecnológicas y de investigación mediante el desarrollo del proyecto I+D+i “*Gestión Eficiente de Regadíos*” (OPTIREG 1316).

Para lograr sistemas de gestión responsables que integre todos los recursos (hídricos, energéticos, tecnológicos, medios humanos), adaptativo a las particularidades de las CC.RR. y que busque su eficiencia en términos económicos, sociales y ambientales, con disposición de tomar decisiones de gestión y/o realizar propuestas de mejora viables desde el punto de vista práctico en base a: la capacidad técnica disponible (manejo de software para simulación y análisis de modelos de redes y EB, uso de las TIC, instalación de sensores para registro de datos, energías alternativas...); a las posibilidades que ofrece el mercado eléctrico (compra directa de energía a través del pool); y a la facultad de autoevaluación de la gestión realizada mediante el seguimiento y análisis del uso conjunto del agua y de la energía en base a parámetros e indicadores de gestión con el objetivo de detectar posibles ineficiencias y minimizar el consumo energético, al objeto de lograr una rentabilidad y sostenibilidad de aquellas infraestructuras de regadío que dependen de la energía eléctrica para su funcionamiento, se concibe OPTIREG.

El proyecto OPTIREG trabaja en una serie de bloques programados e interrelacionados entre ellos, que son: implantación de energías renovables, mercados eléctricos y compra-venta de energía, eficiencia hídrica y eficiencia energética, orientadas al objetivo principal del mismo, que es optimizar la eficiencia hídrica y energética y la tecnificación de las zonas regables que permita su viabilidad económica.

Para el adecuado desarrollo del proyecto, se están constituyendo zonas piloto donde se recaba información y se aplicará la incorporación de soluciones técnicas de asesoramiento al regante que permitirá un Know how extrapolable a nivel nacional.

Dentro del bloque de trabajo WP3 “*Eficiencia energética*”, el objetivo principal del proyecto es obtener una visión global de la tecnología aplicada en la gestión de las CC.RR. como consumidores de energía, detectando sus disfuncionalidades para aplicar diversas estrategias prácticas orientadas a mejorar la eficiencia energética haciendo uso de la tecnología disponible. Para ello la metodología de trabajo del bloque WP3 consiste en realizar actuaciones paralelas con contenidos temáticos de gran diversidad que a continuación resumimos:

- Actualización y conocimiento del estado del arte.
- Recopilación de medidas de eficiencia energética.
- Caracterización de CC.RR. de Castilla y León (en adelante CyL).
- Obtención de datos hidráulicos y eléctricos en zonas piloto y CC.RR. colaboradoras. Análisis y tratamiento de los mismos. Elaboración de curvas, parámetros e índices para mejorar la gestión y regulación con fines a mejorar la eficiencia energética.
- Auditorías energéticas en las zonas piloto siguiendo la metodología del IDAE.
- Elaboración y calibración de modelos hidráulicos de EB y red de riego de las zonas piloto.
- Análisis de escenarios simulados con fines a valorar nuevas estrategias de gestión que mejoren la eficiencia energética sin que se vea mermada la calidad del servicio (presión y caudal en el hidrante), ni aumenten el coste energético anual. Comparativa entre escenarios simulados y reales.
- Pasarela de comunicación entre el programa de gestión de riego Progar y Telegestar. Protocolos operativos de funcionalidades disponibles en Telegestar (supervisa, valida programación, organiza riegos, optimización bombeos, optimización regulación de bombeo) en las zonas piloto.

En el presente trabajo se presenta los primeros resultados del grupo WP3 obtenidos de las principales líneas de trabajo en las que se están desarrollando diversas actividades orientadas a analizar el funcionamiento de varias instalaciones colectivas de riego y adoptar estrategias que mejore la gestión de la red optimización el uso de la energía.

### **3- Material y descripción del proceso de trabajo**

La efectividad de los estudios, conclusiones y medidas de mejora que pretende buscar y obtener el proyecto OPTIREG se está logrando gracias a la colaboración de varias CC.RR., a las que se se les han realizado visitas para conocer su actual situación, organización del riego, nivel de automatización, estado de los equipos y su interés de colaboración como zonas piloto. De momento, se han realizado entrevistas a seis CC.RR. de CyL, de las cuales se han firmado convenios de colaboración con cinco de ellas, a la espera de efectuar otras visitas pendientes y que se sumen otros convenios al proyecto.

Con las CC.RR. que se han firmado convenios de colaboración, los estudios que se están realizando son en base a los datos recogidos en la memoria del SCADA, como también los proporcionados en las facturas eléctricas y en las curvas de potencia consumida facilitadas por la empresa distribuidora eléctrica. En base a esta información, los estudios y análisis principalmente están orientados a obtener las curvas de frecuencia de caudales y parametrizar las curvas operativas de la EB altura/caudal (H-Q), potencia/caudal (P-Q) y rendimiento/caudal (Rto-Q) para evaluar en qué rangos de eficiencia se está bombeando los caudales demandados y proponer medidas de mejora.

Se pretende en un próximo estudio realizar una evaluación individual de cada una de las bombas que compone la EB mediante la instalación de un analizador de redes y un caudalímetro portátil de cara a determinar las prestaciones y el rendimiento de los equipos individuales y en su conjunto, y poder conocer: los desvíos existentes entre las curvas emitidas por el fabricante (ya sean de catálogo o de banco de ensayo) y las curvas reales; detectar si alguna bomba puede estar trabajando con rendimientos menores al esperado por



envejecimiento, incorrecta elección o mala regulación; y reconfigurar la secuencia de activación/parada de la composición de los grupos (fijos y velocidad variable) que mejore la curva global Rto-Q de la EB seleccionando los puntos de transición de estado.

Por otro lado, se están llevando a cabo estudios pormenorizados de eficiencia energética en dos zonas pilotos en las que el Grupo Tragsa tiene encomiendas de gestión y mantenimiento desde hace varios años. Son las CC.RR. del Canal de la Margen Izquierda del Porma (en adelante CRRMIP) y del Canal del Páramo Bajo (en adelante CRRCPB), ubicadas ambas en la provincia de León. En general se trata de dos grandes zonas regables con redes presurizadas mediante bombes de inyección directa con riego a la demanda programada, que cuentan con hidrantes de riego automatizados con telecontrol.

En ambas zonas piloto se dispone de muchos registros de parámetros de uso de las redes, principalmente tiempos y caudal de cada riego por hidrante, horario de apertura y cierre de los mismos, presiones en varios nodos, así como también de los que acontecen en la EB (kWh consumidos, presiones y caudales bombeados...) para cada escenario de riego que se tenga programado. Como también se dispone de la información apropiada para modelizar la red y la EB mediante herramienta informática apropiada, se están llevando a cabo estudios hidráulicos-energéticos enfocados a proponer medidas de gestión de mejora de la eficiencia energética e hidráulica cuantificando el efecto de su implantación para estudiar su viabilidad. Estos estudios de mayor entidad en los que se hace necesario el modelo hidráulico de la red (y su calibración) también se llevarán a cabo en varias de las CC.RR. colaboradoras según la situación energética en que se encuentre y la prioridad de mejora que pueda obtenerse.

Para la medida in situ de la presión en aquellos puntos de la red que sea de interés el equipo WP3 cuenta con instrumentación de campo que ha adquirido como son dos sondas portátiles (modelo CPH6200 de WIKA) con registro continuo y alta capacidad de almacenamiento, así como 10 transductores de presión.

Además de las zonas regables, ya sean pilotos o colaboradoras, se han firmado dos convenios más de colaboración: uno con el equipo de GESTAR de la Universidad de Zaragoza con el fin de implementar la herramienta Telegestar en combinación con el programa de gestión de riego PROGAR en las zonas piloto de León; y otro con SEIASA Delegación Territorial Norte por el cual han facilitado los informes de final campaña de 30 CC.RR. de un período de dos ó tres años al objeto de realizar un análisis de parámetros e índices de gestión para caracterizarlos con metodología de benchmarking.

#### **4- Recopilatorio de medidas de eficiencia energética**

Una de las primeras actividades que se llevó a cabo dentro del proyecto OPTIREG fue la recopilación de documentación técnica específica relacionada con los objetivos del equipo WP3 para tener una visión global del estado actual del arte relacionada con la gestión y la eficiencia energética. La documentación recopilada proviene de cursos, revistas especializadas, simposios, congresos, encuentros formativos, jornadas técnicas, tesis doctorales, IDAE, etc. Si bien mucha de esta documentación menciona, cataloga o incluso expone medidas de eficiencia energética en CC.RR., bien es cierto que no se encontró un documento que aglutinara todo el abanico de posibles medidas de eficiencia energética que se encuentran dispersas en los distintos trabajos de investigación analizados.

Con ello, una de las actividades del proyecto OPTIREG ha consistido en disponer en un documento único la recopilación de toda una batería de medidas y acciones orientadas al ahorro y eficiencia energética en el regadío (principalmente para reducir la factura eléctrica y el consumo de energía total en la campaña) si se aplican de manera adecuada. No pretende ser un catálogo exhaustivo, sino una exposición de todas las medidas que se ha ido encontrando en la distinta bibliografía, así como las que son producto de la propia



experiencia que se está adquiriendo en base al proyecto OPTIREG.

El coleccionable de medidas de eficiencia tiene interés y practicidad a todos los usuarios y principales actores de la explotación de la instalación (gestores, regantes, guardas, operarios, administrativos...) que tienen su parte de responsabilidad en la eficiencia energética final del mismo. Algunas de las medidas precisan de esfuerzos económicos, de investigación y de innovación para que pueda ser puesta en marcha en aplicaciones a gran escala, pero en numerosas ocasiones será rentable con nulo o bajo coste de implementación, consiguiendo significativos ahorros tanto de potencia como de energía sin comprometer la calidad del servicio,

El trabajo recopilatorio de medidas se ha dividido en varios bloques interdependientes entre sí, pero con suficiente estructura individual en cada uno de ellos: equipos de bombeo (11 medidas generales y 15 particulares); regulación de la EB (15 medidas generales y 13 particulares); equipamiento instalaciones colectivas (5 medidas generales y 13 particulares); equipamiento en instalaciones de parcela (11 medidas generales y 40 particulares); consumo de agua (13 medidas generales y 19 particulares); operaciones de gestión (11 medidas generales y 8 particulares); contratación del suministro eléctrico (14 medidas generales); formación y concienciación (11 medidas generales); y toma de datos y mediciones.

Además de estas medidas de eficiencia energética, se está trabajando en otra línea paralela a este fin y orientado al diseño técnico de nuevas infraestructuras de riego colectivo utilizando criterios de eficiencia energética (proceso de reingeniería).

## **5- Caracterización de CC.RR. de Castilla y León**

Una parte del trabajo que lleva a cabo el grupo WP3 consiste en analizar la relación agua y energía en varias zonas regables modernizadas, principalmente de CyL. El objetivo de esta parte del proyecto OPTIREG es obtener indicadores que permitan evaluar la situación energética e hídrica (ratios de consumo y de costes de agua y energía) de las CC.RR. estudiadas, y cuya cuantificación sean útiles para la formulación de recomendaciones que permitan racionalizar su uso, obtener valores energéticos de referencia del regadío castellanoleonés, comparar los valores entre la misma Comunidad de Regantes (en adelante C.RR.) y entre varias CC.RR. (benchmarking) y proponer nuevos índices de estudio.

El abanico disponible de CC.RR. a evaluar es de 30 (datos facilitados por SEIASA Delegación Territorial Norte), y en esta ponencia se presenta los resultados obtenidos en 12 de ellas durante un periodo de dos años (2010-2011), aunque en alguna C.RR. tiene datos hasta un periodo de 5 años.

Las 12 CC.RR. seleccionadas poseen unas características comunes:

- Cultivos: predominan tanto cultivos herbáceos de invierno (trigo, cebada, centeno, avena y colza) a los que se les aplica riegos en sus últimas fases de desarrollo, como los de verano, siendo éstos los que se siembran en mayor proporción (maíz principalmente, seguido de remolacha y patata). Destaca en menor medida alfalfas y pratenses, girasol y hortalizas. En cultivos anuales, no se realiza una segunda cosecha, con alguna excepción. Los cultivos leñosos tienen una presencia escasa, predomina la viña para vinificación, así como el cultivo del chopo y algún frutal (manzanos y perales).
- Sistemas de riego: la mayoría de las CC.RR. disponen de riego por aspersión en sus varias vertientes (coberturas, pivots y cañones), si bien en una gran parte de la superficie el riego se realiza con cobertura aérea, y en menor medida con el resto de los sistemas. El riego por goteo apenas es presencial, excepto una C.RR. que tiene bastante proporción de este sistema por la implantación de la viña.
- Procedencia del agua: en todas ellas procede de captaciones superficiales, ya sean de tomas directas de ríos o de embalses de regulación, transportando el agua por medio de

- un sistema de grandes canales de riego hasta cabecera de la zona regable. No hay presencia de pozos ni de recursos hídricos subterráneos.
- Calendario de la campaña de riegos: si la climatología viene muy desfavorable (calurosa), los primeros riegos se suelen dar a mediados de marzo, pero por lo general en un año normal no es hasta principios-medios de abril cuando se empieza a regar. Finaliza la campaña entre septiembre y principios de octubre.
  - Condiciones climatológicas durante la campaña (abril-septiembre): la precipitación acumulada promedio es de 157 mm, la ET<sub>o</sub> acumulada promedio es de 844 mm y la velocidad media del viento es de 1,75 m/s, por lo que los sistema de riego (mayoritariamente aspersión) no se ven muy influenciados en el proceso de aplicación del agua por este factor negativo poco controlable.
  - Sistema colectivo: en general se trata de CC.RR. que han tenido procesos de modernización recientemente, en el que predomina la misma tipología de infraestructura que consiste en una red colectiva de tuberías a presión de topología ramificada que finaliza en un hidrante general compartido (multiusuario) entre varios regantes, y a partir de éste se llega a la parcela mediante un sistema de tomas individuales, aunque existe variantes tanto de la composición del hidrante y de la toma (valvulería) como en el sistema de llegar hasta la finca. No existen rebombes individuales en las fincas.
  - Estaciones de bombeo: todas las CC.RR. poseen una o varias EB si hay sectores independientes. Todas las EB se abastecen de energía eléctrica en línea de media tensión y con contratación de tarifa eléctrica de seis periodos (potencia mayor de 450 kW). Los equipos de elevación son a balsa para riego por gravedad desde ésta o de inyección directa a red a una presión constante o variable según los casos.

En cuanto a los indicadores de benchmarking utilizados, se ha basado el estudio en la propuesta del “International Program for Technology and Research on Irrigation and Drainage” IPTRID (Malano y Burton, 2001), considerando también otros indicadores propuestos por diversos autores (Rodríguez, 2003; Córcoles, 2009; Tarjuelo et al. 2010; Abadía et al., 2010, Soto et al., 2014). Además de comparar los resultados obtenidos con los elaborados por los distintos grupos de investigación, se ha propuesto nuevos indicadores que no figuran en los trabajos de los autores mencionados, de cara a buscar la idoneidad de indicadores comparativos que tenga en consideración las distintas tipologías de CC.RR. con las que nos podemos encontrar. El trabajo completo analiza el valor de 58 indicadores (descriptivos, de rendimiento y de eficiencia) si bien en esta comunicación se presenta aquellos que mejor describen y permiten caracterizar las zonas regables desde un punto de vista energético. La tabla 1 describe 18 de los 58 indicadores estudiados, cuyos valores obtenidos se analizará más adelante.

**Tabla 1.** Descripción de los indicadores empleados (elaboración propia)

ACRÓNIMO	NOMBRE DEL INDICADOR	UNIDAD	DESCRIPCIÓN
Sr	Superficie regada	ha	· Superficie total de las parcelas en el sector hidráulico independiente (SH) o en la CR que han recibido aporte de agua de riego en la campaña.
V <sub>T</sub>	Volumen de agua que entra al sistema	m <sup>3</sup>	· Cantidad total de agua que entra al SH o a la CR, medida en los contadores generales de la EB (frecuentemente son caudalímetros) · Incluye la cantidad de agua bombeada para riego, en redes a presión, así como el agua desviada en redes por gravedad si ésta ha sido registrada en los contadores generales. · También incluye el agua que ha sido bombeada o derivada por gravedad para realizar limpiezas de la red y la que ha fugado por roturas
ED	Eficiencia de distribución	%	· Cociente entre el volumen de agua de riego suministrado a los usuarios y el volumen de agua que entra al sistema · Indica el porcentaje de agua que entra en el sistema y que no llega a los usuarios finales por diferentes causas: agua fugada por fallos y roturas en la red; vaciados controlados de la red por los desagües; errores de los contadores...
VsSr	Suministro de agua por unidad de área regada	m <sup>3</sup>	· Volumen suministrado a los usuarios del SH o la CR respecto a la superficie regada

ACRÓNIMO	NOMBRE DEL INDICADOR	UNIDAD	DESCRIPCIÓN
ICE	Índice de carga energética	mca	· Presión media ponderada de bombeo durante la campaña de riegos · Tanto en bombeos a punto fijo como en inyección directa a red representa la presión media a la que han bombeado los equipos a lo largo de toda la campaña como diferencia entre la presión en la impulsión y la aspiración. · Si no se ha medido y promediado, la presión se corresponde con la presión nominal de los equipos de bombeo especificadas en la placa de características técnicas
NcSr	Potencia contratada por unidad de área regada	kW ha <sup>-1</sup>	· Cociente entre la máxima potencia contratada y la superficie regada del SH o la CR
NcVs	Potencia contratada por volumen de agua suministrado	kW hm <sup>-3</sup>	· Cociente entre la máxima potencia contratada y el volumen de agua suministrado a los usuarios
INc	Índice de potencia contratada	kW hm <sup>-3</sup> mca <sup>-1</sup>	· Cociente de la máxima potencia contratada entre el volumen de agua que entra al sistema y la altura manométrica nominal
EaSr	Energía activa total consumida por unidad de área regada	kWh ha <sup>-1</sup>	· Cociente entre la energía activa total facturada en el SH o en la CR y la superficie regada
EaV <sub>T</sub>	Energía activa total consumida por volumen de agua que entra en el sistema	kWh m <sup>-3</sup>	· Cociente entre la energía activa total facturada en el SH o en la CR y el volumen de agua que entra al sistema
EEB	Eficiencia energética de bombeo	%	· Cociente entre la energía hidráulica total suministrada y la energía activa total consumida
IEa	Índice de carga de energía activa consumida	kWh hm <sup>-3</sup> mca <sup>-1</sup>	· Cociente de la energía activa total consumida en el SH o en la CR entre el volumen de agua que entra al sistema y la altura manométrica nominal
RtNc	Rendimiento teórico medio de uso potencia en julio y durante el periodo tarifario P6	%	· Cociente entre la potencia teórica media absorbida en julio y durante el periodo tarifario P6 (o en valle para el suministro 3.1.A) y la potencia contratada para el periodo considerado · Representa el grado de ajuste o de aprovechamiento de la potencia teórica promedio de funcionamiento de la instalación con respecto a la potencia contratada para el mes de julio
GCea	Gasto energético por energía	%	· Cociente entre el coste del término de energía y el coste energético
GCep	Gasto energético por potencia	%	· Cociente entre el coste del término de potencia y el coste energético
CENSr	Coste energético por área regada	€ ha <sup>-1</sup>	· Cociente entre el coste energético y la superficie regada
CENVs	Coste energético por volumen suministrado a los usuarios	€ m <sup>-3</sup>	· Cociente entre el coste energético y el volumen de agua suministrado a los usuarios
ICEN	Índice de coste energético	€ hm <sup>-3</sup> mca <sup>-1</sup>	· Cociente del coste energético entre el volumen de agua que entra al sistema y la altura manométrica nominal

INc, IEa, RtNc, GCea, GCep y ICEN son nuevos indicadores propuestos derivados de otros índices al objeto de atenuar la discrepancia existente entre distintas tipologías de CC.RR. cuando se enfrentan ante un mismo indicador. De esta manera, tres de ellos (INc, IEa y ICEN), trata de obtener un valor de referencia que aglutine el volumen que se consume y la altura manométrica a la que se bombea. Por otro lado, GCea, GCep son dos indicadores que hace referencia al porcentaje total de la factura eléctrica que se destina a energía y a potencia respectivamente.

Los valores de los 18 indicadores de las 12 CC.RR. estudiadas se muestran en la tabla 2, en donde se hace referencia a la denominación de cada C.RR. con un primer número seguido de otro número en aquellas CC.RR. formada por varios sectores; además en cada C.RR. y sector se muestra con la referencia BB si se trata de un bombeo a balsa, con BD si se trata de un bombeo directo a red y con BB-BD si se trata de una misma EB en el que hay instalados dos bombeos independientes (uno a balsa y otro directo a red) pero en el que las mediciones de los parámetros energéticos no se puede discriminar ya que comparten el mismo contador de energía.

El tratamiento que se ha realizado a los valores obtenidos de los indicadores ha sido de estadística descriptiva (medidas de posición y dispersión de la media) para conocer la variabilidad en las campañas de estudio (en la mayoría de los casos dos años) para cada una de las 12 CC.RR., como también entre las mismas. Los estadísticos manejados para analizar la tendencia central y la dispersión de los valores son la media aritmética y el coeficiente de variación (CV).

Determinar la similitud entre CC.RR. mediante análisis multivariante Cluster y la evolución de los indicadores a lo largo del tiempo será objeto de un trabajo específico de caracterización que se publicará próximamente.

**Tabla 2.** Indicadores estudiados más significativos (elaboración propia)

Denominación	Sr	V <sub>r</sub>	ED	VsSr	ICE	NcSr	NcVs	INc	EaSr	EaV <sub>r</sub>	EEB	IEa	RtNc	GCea	GCep	CENSr	CENVs	ICEN
CRR 1.1_BB	929	6.279.850	85	5.703	65	1,18	177	2,72	1.904	0,282	63	4.339	57	74	21	193	0,034	440
CRR 1.2_BB	1.020	6.108.661	91	5.439	60	1,18	198	3,30	1.725	0,288	57	4.800	38	77	23	166	0,030	462
CRR 1.3_BB	1.194	7.011.212	82	4.762	78	1,34	230	2,95	1.903	0,326	65	4.176	32	75	23	191	0,041	419
CRR 2_BD	581	2.877.241	96	4.762	80	1,38	282	3,52	1.609	0,325	67	4.069	69	73	27	160	0,034	413
CRR 3_BB	1.651	6.560.002	97	4.001	70	1,57	373	5,32	1.476	0,337	64	4.381	59	78	22	151	0,039	532
CRR 4_BB	1.240	6.700.000		5.411	80	1,77	330	4,13	1.720	0,317	69	3.957	61	84	14	122	0,023	281
CRR 5.1_BD	1.257	9.136.222	94	6.901	70	1,75	246	3,51	1.715	0,234	82	3.336	61	68	30	180	0,026	350
CRR 5.2_BD	676	4.409.975	90	5.796	65	1,80	286	4,40	1.489	0,231	77	3.551	53	69	30	133	0,023	317
CRR 6_BB	114	594.752	98	4.976	75	1,37	277	3,71	2.045	0,400	51	5.336		83	17	181	0,037	485
CRR 7_BD	1.030	5.043.889	98	4.792	102	2,11	435	4,28	1.777	0,364	76	3.587	27	70	30	159	0,033	320
CRR 8.1_BD	935	4.676.757	97	4.807	80	2,29	464	5,80	1.634	0,329	66	4.109	22	68	27	140	0,029	350
CRR 8.2_BD	343	1.798.395		5.206	90	5,13	1.013	11,25	1.755	0,336	73	3.736	11	68	31	172	0,032	359
CRR 9.1_BD	168	1.656.076	85	8.483	77	5,44	550	7,56	2.851	0,273	73	3.736	42	64	35	272	0,028	361
CRR 9.2_BD	121	548.514	80	4.064	71	5,60	1.046	14,82	1.666	0,297	67	4.208	12	49	51	272	0,053	652
CRR 9.3_BD	134	600.604	93	4.242	75	5,20	1.156	15,49	1.361	0,288	72	3.856	9	42	57	226	0,048	645
CRR 9.4_BD	752	2.294.661	92	2.787	65	1,18	392	6,03	825	0,289	62	4.442	24	70	29	72	0,025	390
CRR 10.1_BD	855	3.168.612	92	3.397	82	2,08	571	6,97	1.126	0,305	73	3.722	26	71	29	109	0,032	361
CRR 10.2_BB	572	1.759.553	91	2.786	104	2,50	823	7,91	1.230	0,401	71	3.853	34	91	9	75	0,027	237
CRR 10.3_BB-BD	1.020	2.281.779	88	1.968	130	2,63	1.189	9,14	1.141	0,511	70	3.931	20	66	33	118	0,060	406
CRR 10.4_BB	770	3.158.242	81	3.278	106	2,62	673	6,35	1.475	0,364	79	3.437	41	82	16	110	0,034	257
CRR 11.1_BD	632	1.476.002	100	2.325	66	1,63	697	10,56	924	0,396	45	5.993	32	66	27	93	0,040	605
CRR 11.2_BD	349	834.589	95	2.277	56	1,72	719	12,84	865	0,362	42	6.455	26	53	36	108	0,047	803
CRR 11.3_BD	1.735	4.025.124	98	2.271	75	1,01	437	5,83	907	0,391	52	5.212	43	75	22	73	0,032	421
CRR 11.4_BD	647	1.086.973	91	1.532	64	1,39	828	12,94	775	0,461	38	7.208	26	63	36	83	0,054	776
CRR 11.5_BD	122	267.894	97	2.136	68	4,10	1.866	27,45	898	0,409	45	6.019	13	36	63	155	0,073	1.041
CRR 12.1_BD	3.100	13.946.669	99	4.384	60	0,73	173	2,88	862	0,195	84	3.253	62	88	12	72	0,016	268
CRR 12.2_BD	2.962	13.316.132	99	4.410	61	0,99	230	3,75	897	0,202	83	3.289	50	87	13	76	0,017	275
CRR 12.3_BD	3.265	13.262.484	98	3.949	55	0,77	198	3,61	737	0,183	82	3.330	52	87	13	62	0,015	276
Valor máximo			100	8.483	130	5,60	1.866	27,45	2.851	0,511	84	7.208	69	91	63	272	0,073	1.041
Valor promedio			93	4.173	76	2,23	566	7,46	1.403	0,325	66	4.333	37	71	28	140	0,035	446
Valor mínimo			80	1.532	55	0,73	173	2,88	737	0,183	38	3.253	9	36	9	62	0,015	237
Desviación típica			6	1.603	17	1,47	402	5,45	497	0,078	12,9	1.029	18	13	13	58	0,013	191
Coefficiente de variación			0,21	0,38	0,22	0,66	0,71	0,73	0,35	0,24	0,19	0,24	0,48	0,19	0,47	0,41	0,38	0,43

El análisis de las 12 CC.RR. representa una superficie promedio regada anual de 28.176 ha. El indicador hídrico más representativo es el consumo de agua por unidad de área regada (VsSr) que arroja un valor promedio de  $4.173 \pm 1.603 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ , situándose por debajo del suministro bruto de  $6.888 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$  para CyL, precedente al proceso de modernización (fuente: Plan Nacional de Regadíos Horizonte 2008).

Se comenta brevemente los indicadores energéticos más representativos:

- Índice de carga (ICE): todas las CC.RR. bombean, ya sea a balsa o directamente a red, con presiones que van desde los 130 mca hasta los 55 mca. El valor promedio del ICE es  $76 \pm 17$  mca. Resaltar que todos los bombeos se realizan desde captaciones superficiales (lo más deseable desde un punto de vista energético) en contraste con circunstancias de otras CC.RR. (zona de Levante y Castilla La Mancha) en el que el aporte extra de energía en forma presión es necesario por tener las captaciones de agua en el subsuelo. En todo caso, muchas de las regulaciones que se llevan a cabo se hace por presión constante, por lo que existe un alto margen de mejora en la mayoría de las CC.RR.
- Potencia contratada por unidad de área regada (NcSr) y por volumen de agua suministrado (NcVs): el valor promedio de NcSr es de  $2,23 \pm 1,47$  kW·ha<sup>-1</sup> lo que representa una gran variación entre CC.RR., y algo mayor del nivel de referencia de 2 kW·ha<sup>-1</sup> que requiere una modernización, según recoge la bibliografía existente. Se constata que dentro de la misma C.RR., conforme entra en riego más superficie porque los regantes van amueblando sus parcelas, el valor de NcSr se reduce. En cuanto a NcVs el valor promedio es de  $566 \pm 402$  kW·hm<sup>-3</sup> y su comportamiento es paralelo al de NcSr.
- Índice de potencia contratada (INc): el valor promedio de INc es  $7,46 \pm 5,45$  kW·hm<sup>-3</sup>·ha<sup>-1</sup>. Este índice es el que presenta mayor CV.
- Energía activa total consumida por unidad de área regada (EaSr) y por volumen de agua que entra en el sistema (EaV<sub>T</sub>): el valor promedio de EaSr es de  $1.403 \pm 497$  kWh·ha<sup>-1</sup>, cuantía menor con respecto a los 1.560 – 1.600 kWh·ha<sup>-1</sup> que figura en la bibliografía como valor medio del regadío español. Aún así, todas las CC.RR. se encuadran como grandes consumidoras (EaSr > 1.000 kWh·ha<sup>-1</sup>) según la clasificación propuesta por el IDAE. Respecto a EaV<sub>T</sub> el valor promedio es de  $0,325 \pm 0,078$  kWh·m<sup>-3</sup>, situándose dentro del rango de los 0,28 – 0,34 kWh·m<sup>-3</sup> que figura en la bibliografía como estimación del riego en España.
- Eficiencia energética de bombeo (EEB): el valor promedio de EEB es del  $66 \pm 13$  % por lo que la clasificación energética según el protocolo del IDAE se corresponde con el tipo A (excelente para EEB > 65%).
- Índice de carga de energía activa consumida (IEa): el valor promedio de IEa es de  $4.333 \pm 1.029$  kWh·hm<sup>-3</sup>·mca<sup>-1</sup>. Existe una relación directa entre IEa y EEB. Los valores mayores de EEB implican los menores valores de IEa.

En cuanto a los indicadores más representativos que tienen en cuenta los costes de energía y de potencia contratada (sumatorio de todas las facturas del año incluyendo el impuesto eléctrico y sin contar el IVA) destacamos los siguientes:

- Gasto energético por energía (GCea) y por potencia (GCep): el valor promedio de GCea es del  $71 \pm 13$  % y el de GCep es del  $28 \pm 13$  %, lo que nos da una idea del porcentaje de la factura eléctrica total que se destina al pago de energía consumida y a la potencia contratada.
- Coste energético por área regada (CENSr) y por volumen suministrado (CENVs): el valor promedio de CENSr es de  $140 \pm 58$  €·ha<sup>-1</sup> y el de GCep es de  $0,035 \pm 0,013$  €·m<sup>-3</sup>, valores considerados no excesivos con respecto a regadíos de otras geografías españolas.
- Índice de coste energético (ICEN): el valor promedio de ICEN es de  $446 \pm 191$  €·hm<sup>-3</sup>·m<sup>-3</sup>. El menor valor de este índice de obtiene en la CRR 10.2\_BB pese a que tiene un índice de carga energética (ICE) bastante alto, de 104 mca. Esta C.RR. obtiene el mayor valor de GCea (91 %), lo que podría indicar que la potencia contratada está muy bien escogida.

Por falta de espacio no se presenta la comparación de los resultados con los publicados en otros estudios de caracterización de CC.RR. de otras geografías españolas, y en todo caso, animamos a los investigadores a seguir realizando trabajos de esta índole y puestas en común de los resultados para poder realizar comparativas entre distintas zonas regables de España.

Del estudio de los indicadores se deduce que las 12 C.RR. analizadas pueden mejorar en los siguientes aspectos:



- Aumento de la superficie regada anual con respecto a la superficie total regable disponible. El proceso de amueblamiento en parcela según qué zonas, es lento; o no todos los regantes hacen uso de las nuevas infraestructuras, dándose casos en los que conviven los dos sistemas (riego por superficie y riego a presión). A mayor superficie regada anual muchos índices mejoran en valor absoluto.
- La presión de bombeo si bien está ajustada a las necesidades del sistema, cambiar su regulación (de punto fijo a curva de consigna por escalones, o incluso a dinámica) y/o reconfigurar la secuencia de activación/parada de los grupos mejoraría los valores obtenidos de los índices.
- La potencia contratada en la mayoría de las situaciones se puede ajustar mejor, si bien incurriría en cambios en la organización de los riegos (concentración, riego nocturno, aprovechamiento de todas las horas disponibles P6...).

Finalmente resaltar que la CRR 12 se identifica con la CRRCPB, evaluada como zona piloto en el proyecto OPTIREG y en la que el Grupo Tragsa realiza trabajos de gestión y mantenimiento. Esta C.RR. es de las que obtiene los mejores resultados en la mayoría de los índices evaluados.

## 6- Estudios energéticos en zonas piloto

Otro pilar de trabajo del grupo WP3 es estudiar medidas de eficiencia energética enfocadas en la gestión de los riegos que se realiza durante la campaña de riegos. Para ello se cuenta con dos CC.RR. emplazadas en la provincia de León y en la que el grupo Tragsa realiza la gestión, el mantenimiento e incluso la compra de energía en mercado del pool eléctrico: la CRRMIP de 12.499 ha de superficie regable y 5.700 ha de superficie regada anual, dividida en varios sectores; y la CRRCPB que cuenta con 15.957 ha de superficie regable y 13.090 ha de superficie anual regada, también fragmentada en varios sectores.

Los trabajos desarrollados han sido la elaboración de un modelo hidráulico completo de un sector de riego en cada una de las dos zonas piloto con el programa GESTAR: sector XI en la CRRMIP que abarca 1.592 ha, cuenta con 153 hidrantes, 43.353 ml de tubería (PVC-U y PRFV) y una EB de inyección directa a red compuesta por un total de 9 bombas de diversos tamaños con presiones de bombeo desde los 48 mca hasta los 55 mca; y el sector I de la CRRPB que abarca 3.951 ha, cuenta con 318 hidrantes, 86.287 ml de tubería (PVC-U y PRFV) y una EB de inyección directa a red compuesta por un total de 12 bombas de diversos tamaños con presiones de bombeo desde los 48 mca hasta los 55 mca.

En ambos sectores la presión a servir en los hidrantes que riegan es de 50 mca. Cuentan con un sistema de telecontrol que comanda la apertura y cierre de las electroválvulas y realiza el conteo del caudal promedio de cada riego mediante un emisor de pulsos insertado en el contador. El funcionamiento en cuanto a la organización de los riegos en ambos sectores es similar: el caso general es que cada regante solicite el riego por teléfono con una antelación de 48 horas en el que indica la hora del comienzo y la duración del riego de sus parcelas. El gestor con ayuda del PROGAR (programa de gestión de riegos) organiza las peticiones buscando la máxima eficiencia: no saturación de las líneas de transporte, concentración de caudales para los puntos de funcionamiento de las bombas con mejor rendimiento y no sobrepasar la potencia contratada en los distintos tramos horarios. Además, hay particulares como el riego por gravedad en el caso de la red del sector XI de la CRRMIP a ciertos hidrantes, o turnos fijos en algunos hidrantes que se han establecido con aprobación del regante.

En cualquier caso, se dispone de todos los registros de cada escenario de riego que se vaya produciendo a lo largo de la campaña de riegos, históricos necesarios para calibrar y evaluar el modelo hidráulico de la red con fines a proponer mejoras mediante escenarios simulados: tanto en la red (qué hidrantes han abierto y a qué caudal promedio han regado,



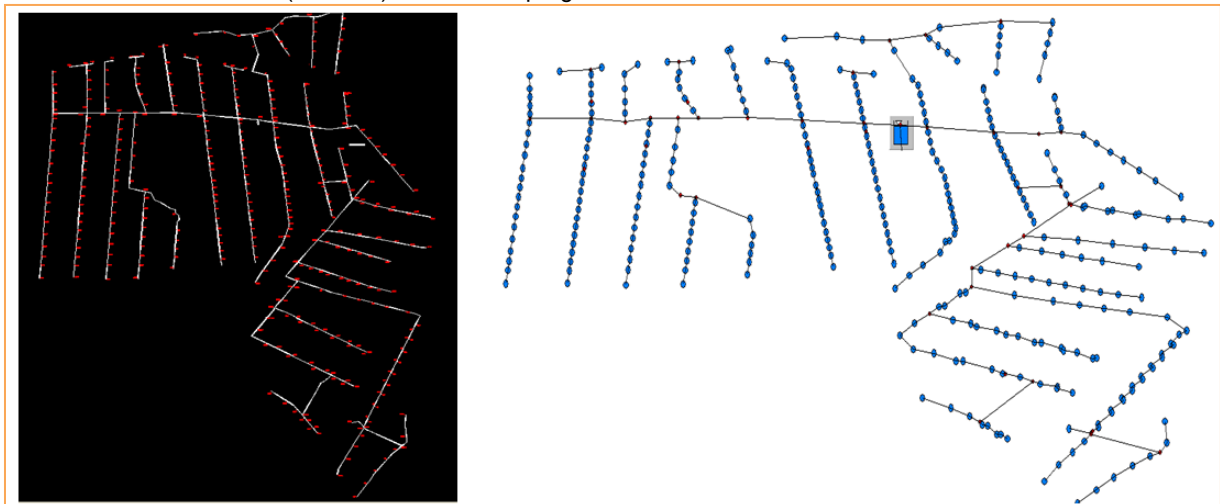
así como registro de presiones en varios hidrantes en donde se hayan instalado transductores y sondas); y en la EB (presión reinante en los colectores de aspiración e impulsión, caudales bombeados y kWh consumidos).

El modelo de cada red debe de reproducir mediante un programa de simulación (en este caso GESTAR) el comportamiento real del sistema físico que representa con la mayor exactitud posible. Se incide en este punto en la importancia que, para la bondad del modelo, tiene la obtención de una información precisa de los elementos que componen el sistema de distribución a modelar. La bondad del modelo depende muy directamente de la precisión de los datos de partida. El proceso de elaborar cada modelo ha supuesto recopilar información de todos los elementos significativos y existentes de la red y tratarla para poder ser asimilada por el programa de análisis y simulación, provenientes principalmente del proyecto de liquidación de cada obra (As-built) y de datos actualizados facilitados por el gestor:

- Topología de la red. Toda esta información se obtiene de los planos reales de la red y del GIS para posicionar las coordenadas X E Y de todos los nodos.
- Conducciones. Hay que conocer diámetro interior, longitud, conectividad entre nodos y material. Se establece como rugosidad absoluta los siguientes valores: 0,007 mm para el PVC-U, 0,015 mm para los tubos de PRFV y 0,1 mm para los tubos de acero.
- Bombas. Se debe conocer para cada uno de los equipos de bombeo su potencia, curvas características obtenidas de los ensayos de fábrica, conectividad y niveles de aspiración.
- Puntos de consumo. Cota reales de los hidrantes según los planos de perfiles longitudinales de los ramales (se trata de la cota del terreno a la que se le suma en todos los casos 35 cm), dotación asignada, conectividad a la red y presión de consigna.

Se ha realizado una esqueletización de la red que ha consistido en una simplificación del entramado de tuberías entre la principal y el hidrante (los hidrantes vienen pinchados sobre la propia tubería principal), y no se ha considerado ventosas, válvulas de seccionamiento, válvulas antiretorno, filtros, reducciones, ampliaciones y caudalímetros para los elementos instalados en la EB. Además, se crean dos modelos diferentes, en que se distingue en uno de ellos la EB completa (están modelizadas todas las bombas instaladas junto con sus colectores individuales de aspiración e impulsión); y otro modelo en el que se sustituye el conjunto de bombas y colectores individuales por una pseudo-bomba que engloba el comportamiento de todas y que viene caracterizada por la nube de puntos H-Q, P-Q y Rto-Q, extraídos del SCADA (véase más adelante).

**Figura 1.** Plano constructivo de planta de la red del sector I de la CRRCPB (izquierda) y modelo hidráulico creado de la misma red (derecha) mediante el programa GESTAR



Se efectúa una primera calibración en estática de cada modelo de red, en el que se compara los valores de presión obtenidos de los transductores que hay instalados en varios hidrantes

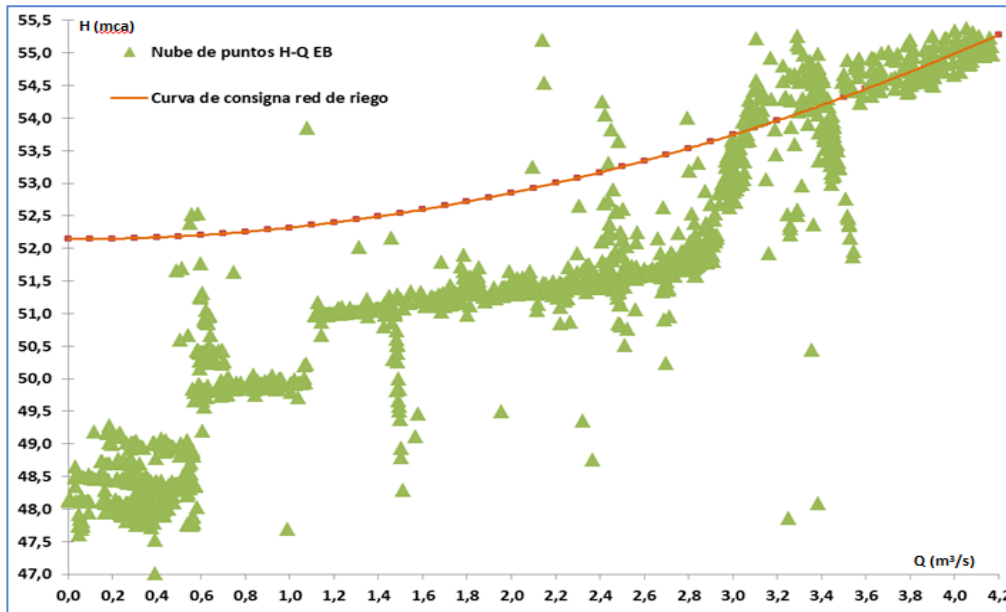
(el valor de la presión se considera como el promedio de los datos transmitidos por el telecontrol cada media hora), con la calculada con el modelo, en dos días que no hubo riego y la red estaba parada. Además de los datos de la presión suministradas en los hidrantes de la red por los transductores es necesario conocer la presión al inicio de la misma, tomada del colector de impulsión.

De los resultados encontramos que las diferencias de presión obtenidas entre el modelo y los transductores instalados en campo no son mayor a 2 mca, por lo que la precisión de las cotas es válida. A continuación se llevó a cabo una calibración en dinámica con apoyo de los históricos que almacena PROGAR y el SCADA de la EB en el que se analizan varios escenarios de bombeo (caudales desde los 100 l/s hasta los 4.000 l/s) y procediendo de la misma manera (comparar los valores de los transductores de presión con las presiones calculadas con el modelo para cada escenario de riego) se llega a resultados muy positivos, en el sentido de que las diferencias encontradas son muy estrechas, con un valor promedio entero de las diferencias entre campo y modelo de 0,82 mca. En conclusión, hemos obtenido un modelo de red con una buena calibración de partida, por lo que los resultados obtenidos en las simulaciones que se realicen a efectos de analizar estrategias de gestión (sin tener que llegar a experimentarlos físicamente) serán fácilmente contrastados y validados en la realidad. Además, se ha calculado con la metodología propuesta por el equipo GESTAR la curva de consigna recomendada (en adelante CCR) de cada una de las redes modelizadas, al objeto de poder compararla con la curva motriz de cada EB y analizar la calidad del servicio y el rango de mejora.

Tan importante es obtener una red bien calibrada, como modelizar el comportamiento real de la EB que suministra el caudal y la presión a ésta. Para conseguir este objetivo, se ha realizado un análisis de los datos proporcionados por el SCADA de la EB durante varios días de riegos de la campaña 2014 y que presentara un gran abanico de valores. En el caso del sector I de la CRRCPB, la presión de bombeo es variable en función del caudal, y ésta viene configurada mediante unos escalones de bombeo programados en el SCADA que gobierna la estación, por lo que se obtiene una nube de puntos H-Q, P-Q y Rto-Q. La metodología empleada ha sido obtener los registros continuos (1 valor cada segundo) de la presión en la aspiración, la presión en la impulsión y el caudal bombeado, y realizar promedios horarios, ya que los valores suministrados por el analizador de redes del consumo energético (kWh) es horario. Conviene indicar que el analizador de redes se encuentra en el cuadro general de la instalación, por lo que la energía registrada incluye todas las pérdidas de la instalación (cableado eléctrico, rendimientos de los motores, bombas, arrancadores y variadores) y los consumos de los servicios auxiliares (sondas, ordenador, ventilación forzada, iluminación, filtro general, automatismos, caudalímetros, motores de las válvulas...).

La figura 2 muestra la nube de puntos H-Q de la EB del sector I de la CRRCPB y la CCR de la red, cuya expresión cuadrática viene dada por  $H \text{ (mca)} = 52,14 + 0,178 \cdot Q^2 \text{ (m}^3\text{/s)}$ .

**Figura 2.** Nube de puntos H-Q de la EB y CCR de la red del sector I de la CRRCPM



De la figura 2 observamos, que efectivamente, la EB funciona con escalones de bombeo, por lo ya que supone un ahorro energético en vez de bombear a punto fijo, como se hace en la muchas de la CC.RR. analizadas. La CCR está a la par con la curva motriz a partir de los 3.600 l/s por lo que se está bombeando correctamente. Entre los 3.000 y 3.400 l/s se aprecia que se está bombeando por encima de la CCR, por lo que si disminuyera la presión de bombeo no conllevaría merma en la calidad del servicio, además de que se produciría un potencial ahorro energético. Entre los 3.400 y 3.600 l/s se observa que se produce un mal recubrimiento entre bombas, como también ocurre a los 1.500 l/s y a los 2.500 l/s. Desde los 0 l/s hasta los 600 l/s se bombea por debajo de la CCR (3,5 mca menos) y entre los 600 hasta los 3.000 l/s se bombea con un promedio de 1,5 mca por debajo de la CCR. En conclusión, hasta los 3.000 l/s se bombea por debajo de la CCR, si bien con presiones no muy distantes a los valores de la curva, por lo que la calidad del servicio no se ve mermada. Además, es preciso ajustar la entrada/salida y estados de transición de bombas en ciertos caudales.

Además de los datos obtenidos de la nube de puntos H-Q, se ha confeccionado la nube de puntos P-Q y Rto-Q y parametrizando todos los pares de datos, se obtiene las curvas que utilizaremos para modelizar la EB en GESTAR (pseudo-bomba). Con todo, obtenemos un modelo completo de red + EB del que se realizan los siguientes estudios y análisis mediante una plataforma de enlace entre PROGAR y TELEGESTAR de manera que las peticiones de riego realizadas y que configura una programación de riegos en PROGAR se carguen en GESTAR de forma automática:

- Simulación predictiva del estado de la red para programaciones de riego temporales. prediciendo todas las variables hidráulicas y energéticas que van a tener lugar en todos los puntos, al ejecutar una determinada programación de riegos.
- Determinar los consumos energéticos y el coste económico total de la programación, de manera que puedan acotarse y ensayar alternativas.
- Reorganización de las peticiones de riego mediante un algoritmo de optimización de tipo evolutivo.
- Supervisar el estado de la red en condiciones de operación con apoyo del telecontrol.
- Recalibración automática del modelo computacional de la red.

## 7- Estudios energéticos en CC.RR. colaboradoras

A continuación se presentan resultados preliminares obtenidos en una de las C.RR. que se han prestado a colaborar en el proyecto de investigación. La zona, regable se denomina “Comunidad de Regantes Virgen del Aviso”, en la provincia de Zamora.

Las características generales de la zona regable son:

- Superficie regable: 1.874 ha
- Nº de parcelas: 1.047
- Nº de regantes: 801
- Sistema de riego: Aspersión
- Cultivos principales de la zona: maíz, alfalfa, remolacha y cereal

Existe una toma en el río Duero que conduce el agua hasta una cántara sobre la que se ubica la EB y desde la que se impulsa el agua directamente a la red de riego. La presión mínima de suministro a cada una de las parcelas es como mínimo de 35 m.c.a. La EB dispone de 6 bombas de eje vertical de las cuales 5 unidades son de 725 kW (3 unidades con variador de velocidad) con un caudal nominal de 2.160 m<sup>3</sup>/h y una altura nominal de 90 m.c.a. y 1 bomba es de 315 kW (con variador de velocidad) con un caudal nominal de 1.080 m<sup>3</sup>/h y una altura nominal de 76 m.c.a. Se dispone de un transductor de presión en el colector de impulsión y el bombeo se realiza a una presión de consigna fija:

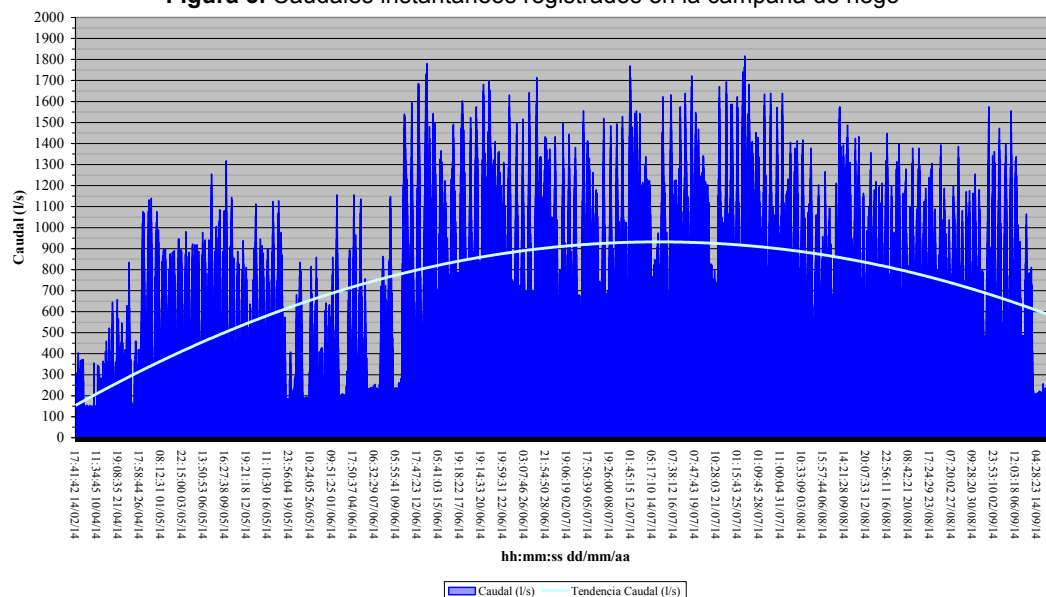
- Presión de consigna máxima: 7,5 bar (76,5 m.c.a.)
- Presión de consigna mínima: 7,4 bar (75,48 m.c.a.)
- Variación de presión consigna: 0,1 bar (1,02 m.c.a.)

A continuación se exponen los resultados obtenidos del estudio de los registros de caudal y presión de la EB para toda la campaña 2014.

### Estudio de caudales

A partir de los registros de caudal proporcionados por el caudalímetro de ultrasonidos de la EB y almacenados en el histórico de datos del SCADA se han representado todos los caudales bombeados en la campaña de riego habiéndose registrado un total de 10.646 registros de caudal y un caudal máximo de 1.816.6 l/s el 25/07/2014 a las 23:04:29.

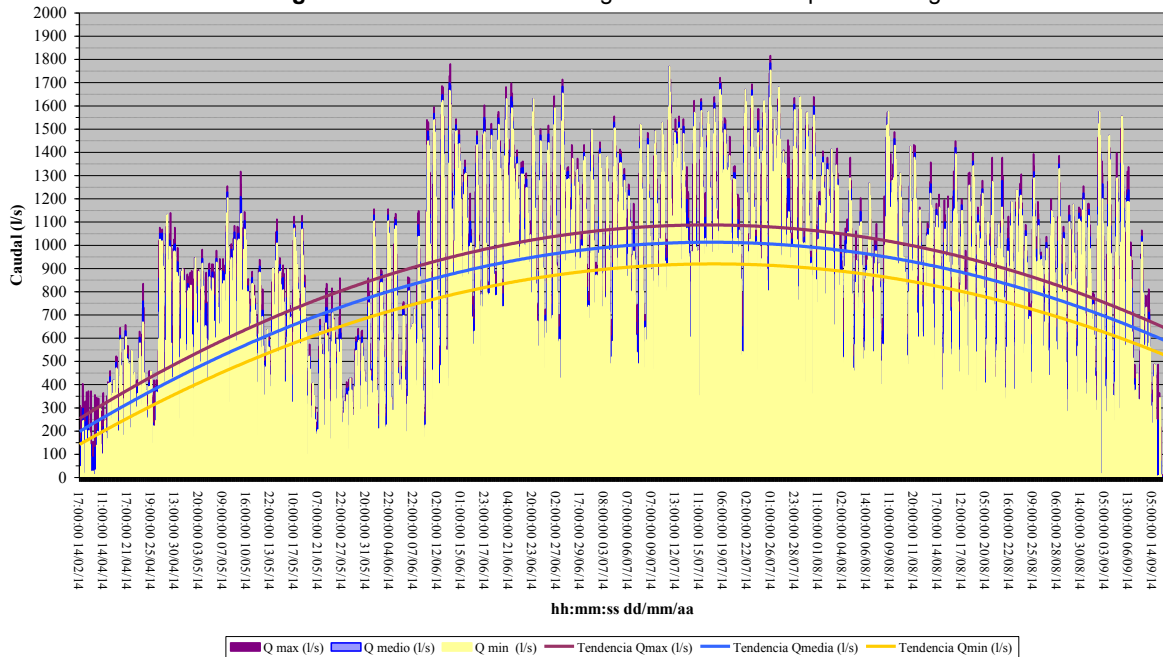
Figura 3. Caudales instantáneos registrados en la campaña de riego



A partir de los caudales instantáneos registrados se han calculado unos caudales promedio horarios, dado que el número de registros por hora es más o menos constante, existiendo entre 6 y 10 datos por hora en los momentos de máximo caudal. En la figura 4 se

muestra el caudal medio horario para cada una de las horas de la campaña de riego así como el caudal máximo y el mínimo horario.

**Figura 4.** Caudales horarios registrados en la campaña de riego

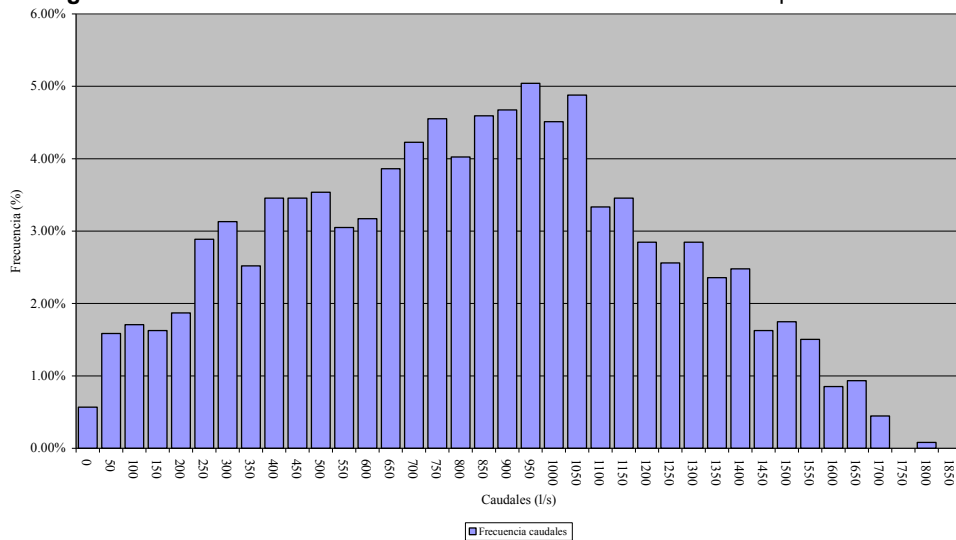


Se observa como existe poca diferencia entre el caudal máximo, el mínimo y el medio para una misma hora de bombeo

A partir de los caudales medios horarios se ha procedido al cálculo de la frecuencia de caudales en la campaña de riego. Se ha optado por emplear valores promedio horarios de caudal para evitar la distorsión en los resultados de frecuencia que podría provocar el tener un número distinto de registros de caudal en cada una de las horas de bombeo, de esta manera tenemos un solo registro para cada una de las horas de bombeo.

Se han establecido intervalos de caudal de 50 l/s, desde los 0 l/s hasta los 1.850 l/s. Computando el número de registros cuyo valor de caudal se encuentran entre los intervalos de caudal definidos ( $Q_i$  y  $Q_{i+1}$ ), se obtienen las frecuencias relativas de ocurrencia de los caudales. Estos registros se transforman en tiempo que el sistema ha estado trabajando en los intervalos de caudal considerados.

**Figura 5.** Frecuencia relativa de ocurrencia de caudales con valores promedios horarios

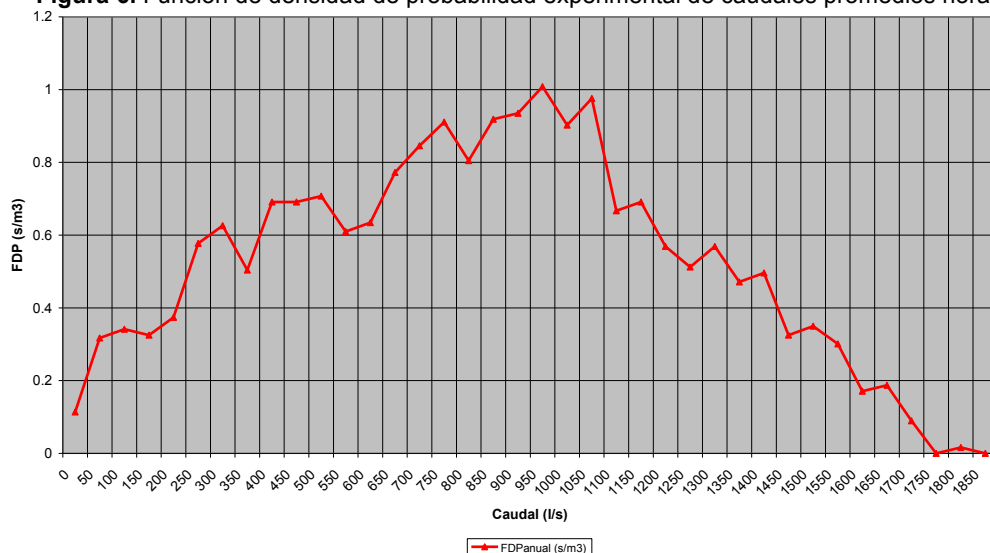


A partir de la frecuencia de caudales podemos construir la Función de Densidad de Probabilidad (FDP). Así la probabilidad de que el caudal demandado  $Q_i$  se encuentre en el rango  $(Q_i, Q_{i+1})$ , será el área debajo de la curva. La FDP para un caudal  $q$  se define como la esperanza del tiempo relativo de existencia de un caudal comprendido entre  $q$  y  $q + dq$ :

$$FDP(q) = \left[ \frac{1}{T} \cdot \frac{dt}{dq} \right] = \frac{1}{T} \left[ \frac{dt(q)}{dq} \right]$$

siendo  $T$ , en segundos, la duración total de periodo de observación de caudales, y  $dt$  el tiempo de presencia de caudales comprendidos entre  $q$  y  $q + dq$ .

**Figura 6.** Función de densidad de probabilidad experimental de caudales promedios horarios



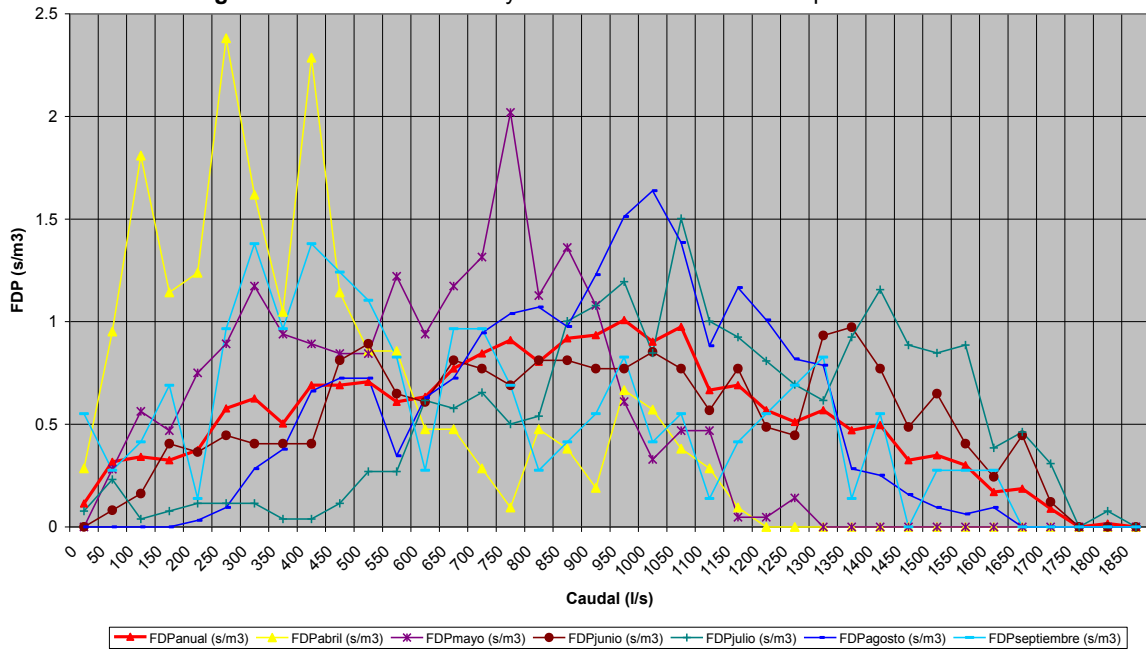
Por definición, toda  $FDP$  está normalizada y satisface:

$$\int_0^{Q_{\max}} FDP(q) \cdot dq = 1$$

Las curvas de la función de densidad de probabilidad mensual, reflejan el comportamiento de la distribución del consumo en cada mes ( $j$ ) proporcionando la noción de la frecuencia de determinados caudales en la cabecera del sistema.



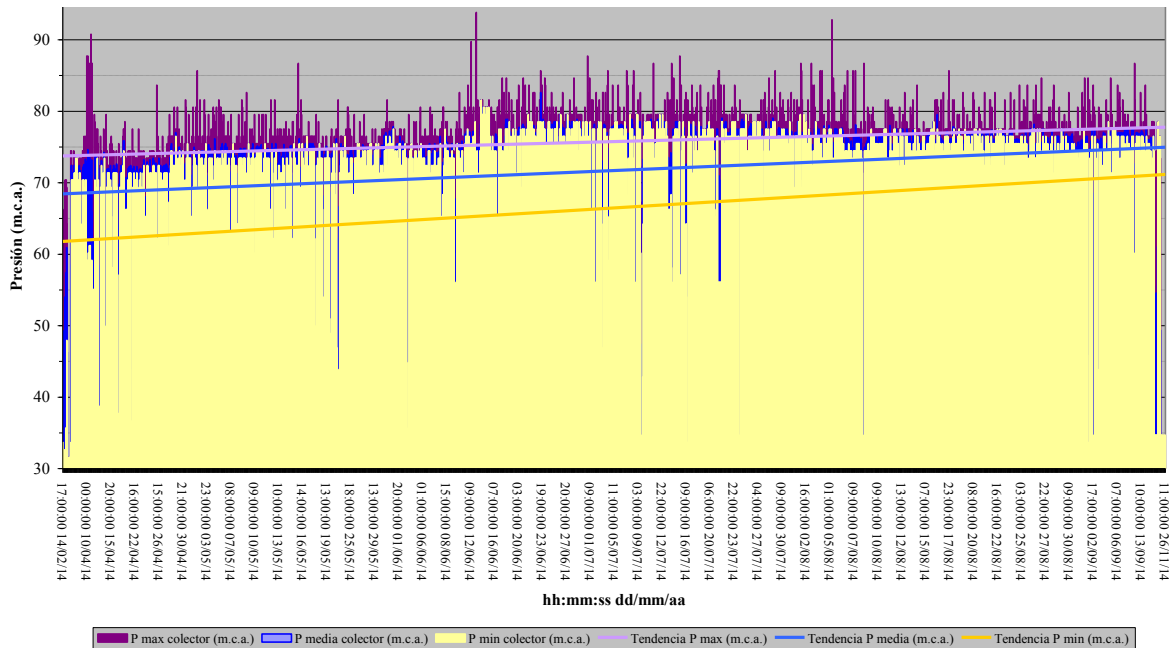
**Figura 7.** Curvas mensuales y anual de FDP de caudales promedios horarios



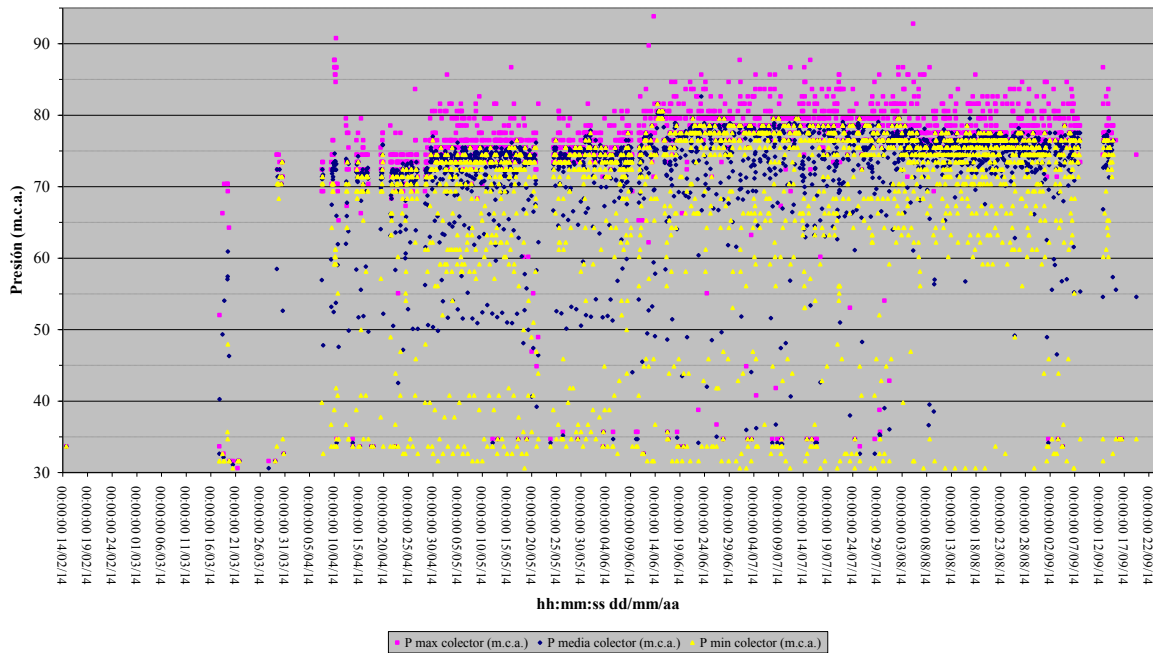
**Nube de puntos de caudal y presión**

A partir de los registros de caudal del caudalímetro, de los registros de presión del transductor ubicado en el colector de impulsión y de la sonda de nivel colocada en la cántara de aspiración, obtenemos una representación completa del funcionamiento de la EB a lo largo de la campaña de riego. A continuación se presentan las presiones horarias en el colector de impulsión a lo largo de toda la campaña de riegos.

**Figura 8.** Presiones horarias colector impulsión

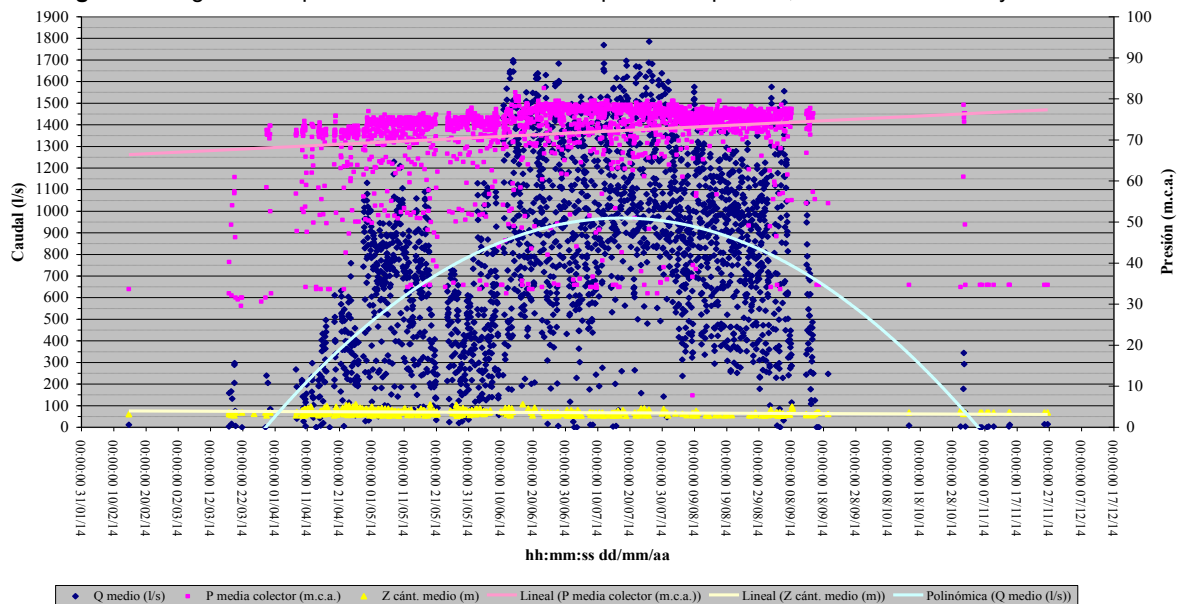


PRESIÓN HORARIA EN EL COLECTOR



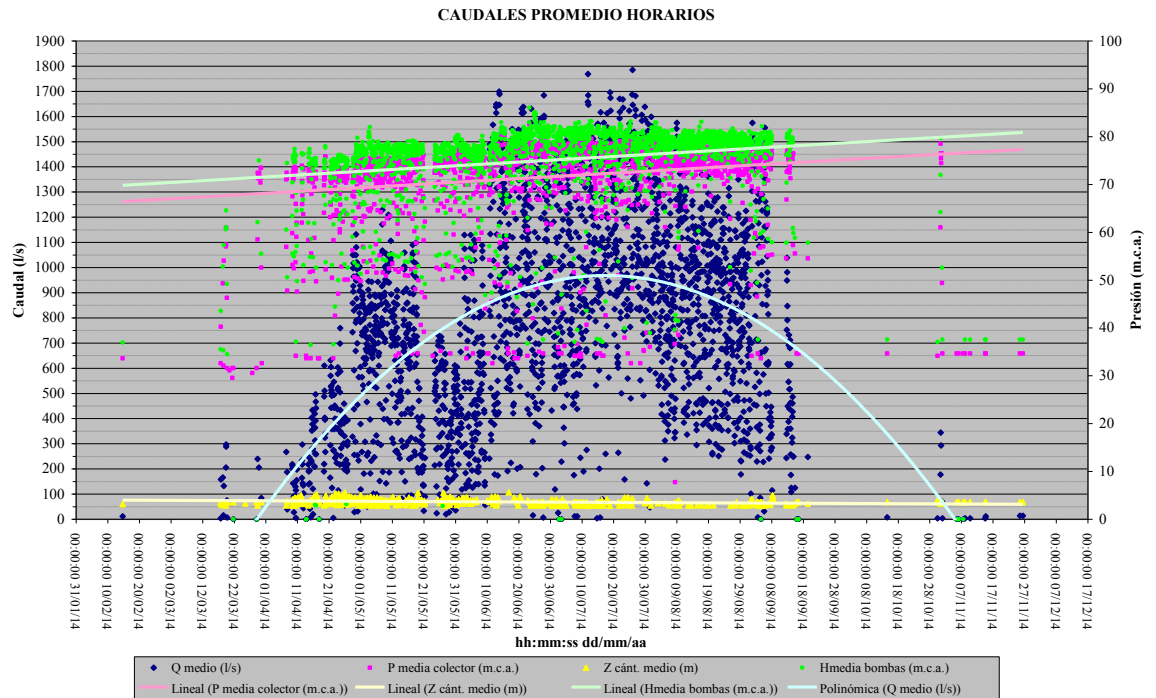
La representación del caudal bombeado, la presión registrada en el colector de impulsión y el nivel de agua en la cántara se muestra en la figura 9:

**Figura 9.** Registro completo de variables en la EB: presión impulsión, caudal bombeado y nivel de cántara



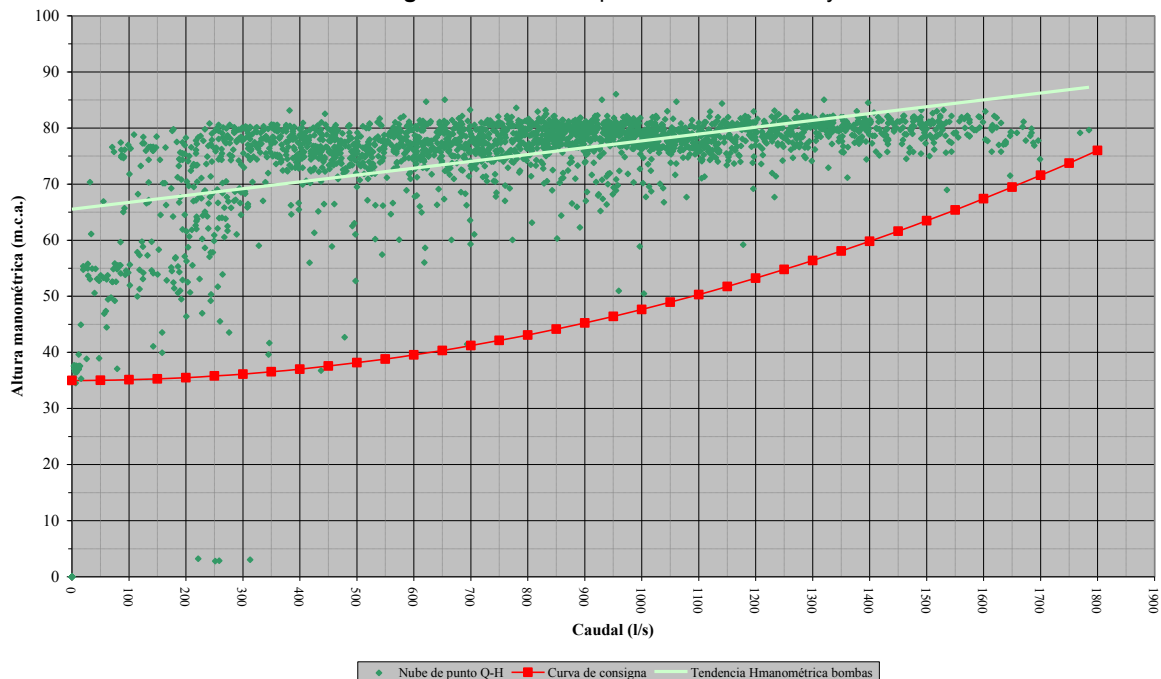
Para obtener el dato de la altura manométrica suministrada por los grupos de bombeo, a la presión registrada en el colector de impulsión habría que restarle la carga de agua sobre el rodete de la bomba en la cántara y sumarle la diferencia de altura entre el rodete de la bomba de eje vertical y la cota del transductor del colector de impulsión.

**Figura 10.** Registro completo de variables en la estación de bombeo con altura manométrica de las bombas



Para comprobar el régimen de funcionamiento de la EB se representa el gráfico de la altura manométrica de las bombas en función del caudal bombeado. También se representa la CCR teórica de la red, cuya expresión cuadrática viene dada por  $H \text{ (mca)} = 35 + 0,0000127 \cdot Q^2 \text{ (l/s)}$ ;  $H \text{ (mca)} = 35 + 12,654 \cdot Q^2 \text{ (m}^3\text{/s)}$ .

**Figura 11.** Nube de puntos H-Q de la EB y CCR



Se observa que la presión de bombeo a la que el SCADA está programado a punto

fijo se encuentra por encima de la CCR teórica, por lo que el margen de mejora es amplio.

## 8- Conclusiones y recomendaciones

- El conocimiento del estado del arte ha permitido confeccionar en un único documento un recopilatorio completo de medidas de eficiencia energética cuya síntesis y redacción de las mismas se ha estructurado en varios bloques: equipos de bombeo, regulación de la EB, equipamiento instalaciones colectivas, equipamiento en instalaciones de parcela, consumo de agua, gestión, toma de datos y mediciones, formación y concienciación, y contratación del suministro eléctrico.
- El estudio de varias CC.RR. de CyL mediante técnicas de benchmarking han permitido caracterizar una parte del regadío modernizado castellanoleonés. Los bombeos se realizan desde captaciones superficiales tanto a balsa como a inyección directa red con un valor promedio del ICE de  $76 \pm 17$  mca en los que predomina una regulación a presión constante, por lo que existe un alto margen de mejora para mejorar la eficiencia energética. El indicador hídrico de consumo de agua por unidad de área regada ( $VsSr$ ) obtiene un valor promedio de  $4.173 \pm 1.603 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ . La energía activa total consumida por unidad de área regada ( $EaSr$ ) es de  $1.403 \pm 497 \text{ kWh} \cdot \text{ha}^{-1}$  y por volumen de agua que entra en el sistema ( $EaV_T$ ) de  $0,325 \pm 0,078 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$ . La eficiencia energética de bombeo (EEB) se sitúa en un valor promedio del  $66 \pm 13$  %. El porcentaje de la factura eléctrica total que se destina al pago de la energía consumida (GCep) es del  $71 \pm 13$  %, y de la potencia contratada (GCep) del  $28 \pm 13$  %. El coste energético por área regada (CENSr) es de  $140 \pm 58 \text{ €} \cdot \text{ha}^{-1}$  y por volumen suministrado (CENVs) de  $0,035 \pm 0,013 \text{ €} \cdot \text{m}^{-3}$ .
- La modelización informática de una infraestructura completa de riego colectivo con objeto de mejorar la eficiencia energética global del sistema conlleva a no separar la EB de la red de riego, y a analizar las sinergias que se producen entre ambas entidades. La documentación de partida para crear el modelo hidráulico así como el proceso de calibración llevado a cabo sobre el mismo es fundamental para el fin perseguido.
- Se debe de mejorar el protocolo de captación/almacenamiento de datos hidráulicos y eléctricos, así como revisar la calibración de las sondas y elementos de medición.
- En general, existe margen de mejora de la eficiencia energética trabajando en varios aspectos: ajuste de la potencia contratada; cambios en la organización del riego para aprovechar todas las horas baratas de los periodos tarifarios; afine de la regulación de los bombeos a las necesidades reales de la red (conocimiento de la curva motriz de la EB vs CCR, entrada/salida y estados de transición de bombas en ciertos caudales); explotación de los datos históricos almacenados en el SCADA, el telecontrol y PROGAR; seguimiento de índices energéticos y comparativa con campañas anteriores; modelización de la red y EB para analizar estrategias de gestión (simulación predictiva de un patrón de riegos, reorganización de peticiones de riego mediante algoritmo de optimización de tipo evolutivo, supervisión del estado de la red...).
- La aplicación de las metodologías diseñadas en las zonas piloto, pone de manifiesto que realizar una buena gestión y mantenimiento es fundamental para conseguir que los regadíos sean eficientes desde el punto de vista hídrico y energético. Se trabaja aprovechando la tecnología disponible y creando una nueva herramienta para facilitar el intercambio de datos entre PROGAR y Telegestar.
- Desde el proyecto I+D+i OPTIREG que está llevando a cabo el grupo Tragsa se invita a las CC.RR. interesadas en mejorar su eficiencia energética a que participen de forma activa mediante un convenio de colaboración.



## DESARROLLO DE UN MODELO RACIONAL PARA EL CÁLCULO DE CAUDALES DE DISEÑO Y CURVAS DE PROBABILIDAD DE FRECUENCIA DE CAUDALES EN BOMBEOS DIRECTOS

*Faci, E, Aliod R, Paño J, García Asín, S*

Área de Mecánica de Fluidos. Grupo I+D+I GESTAR Escuela Politécnica Superior Huesca. [efaci@unizar.es](mailto:efaci@unizar.es), [raliod@unizar.es](mailto:raliod@unizar.es), [jpano@unizar.es](mailto:jpano@unizar.es), [susanag@unizar.es](mailto:susanag@unizar.es)

### Resumen

Se describe un nuevo modelo conceptual para el cálculo de curvas de densidad de probabilidad de caudales, y de los caudales de diseño, en redes de riego a la demanda en que no se cumple una de las principales hipótesis de la formulación de Clément: la igualdad de probabilidad de inicio de riego para todas las horas de la Jornada de Riego (JR). En este modelo, se adapta la formulación de Clément para condiciones en que existen horas no hábiles en la JR para el riego y además el riego se ejecuta de forma ininterrumpida. En tales casos no existe equiprobabilidad de apertura de hidrante a lo largo de la JR. Este comportamiento es habitual en el riego presurizado con sistemas con bombeo directo, e induce caudales de diseño sensiblemente superiores a los dados por la formulación tradicional. Se realiza, para un caso teórico, una comparación los caudales de diseño obtenidos mediante la formulación de Clément, mediante un procedimiento heurístico de simulación de múltiples escenarios (RDDC) y mediante la propuesta en este artículo.

### Abstract

Description of a new model to calculate the probability density functions of flow and the design flow in pipes of irrigation networks in which the hydrant opening probability is not constant during the irrigation day. Clément formulation is adapted to the hypothesis of continuous irrigation and not allowed irrigation time period. These hypotheses cause a non equiprobable hydrant opening probability during the irrigation day. That behavior is quite common in direct pump pressurized irrigation networks and leads to high design flows compared to Clément formulation. Design flows calculated with three different models, proposed model, Clément formulation, and to RDDC, are compared in this paper.

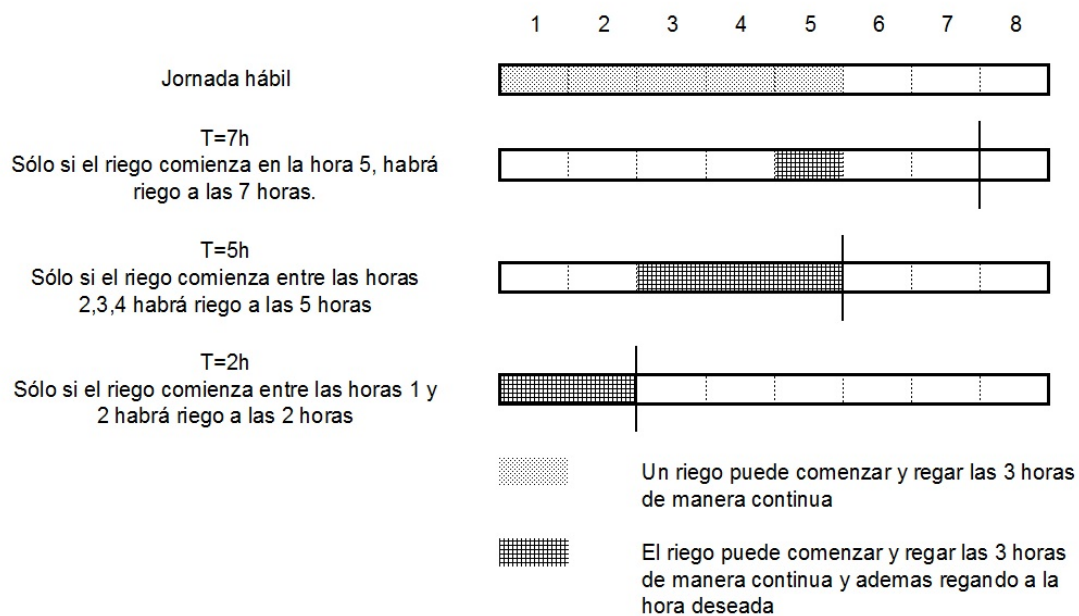
### 1.- Introducción, Objetivos

El objeto de la presente comunicación es describir un modelo conceptual que permite calcular la distribución probabilidad de frecuencia de caudales en cada una de las conducciones de una red de riego estrictamente ramificada, gestionada a la demanda, que se adapta mejor a las condiciones de alimentación por bombeo directo que la formulación tradicional de Clément (1966).

El hecho de que sean habituales las tarifas de precios de la energía en que se penalizan ciertas horas del día induce a los regantes a la exclusión de las mismas

como horas hábiles para el uso de la red. Además, generalmente, el riego de una parcela se desea realizar de forma continua, es decir sin interrupciones debidas a entrar en las horas de exclusión de riego, lo que provoca la no equiprobabilidad de apertura de los hidrantes durante la Jornada de Riego. Efectivamente, cuando las horas restantes para el comienzo del intervalo temporal de riego inhibido sea inferior al tiempo necesario de apertura del hidrante para efectuar el riego total de la parcela, el regante excluirá esas horas de su programación de riegos. En consecuencia, los riegos tendrán mayor probabilidad en la parte central del día, y menor probabilidad cuanto más nos acerquemos a la hora de inhibición del riego (hora de comienzo de la tarifa punta).

En la figura 1 se muestra un ejemplo para un riego de 3 horas en un periodo hábil de riego de 8 horas. Como se observa, la probabilidad de que un hidrante este abierto a la hora 2 es el doble que a la hora 7 y el triple en la hora 5 respectivamente.



**Figura 1.** Representación de no equiprobabilidad de apertura de hidrante

Por tanto, una de las condiciones de la formulación de Clément no se cumple: que la probabilidad de apertura del hidrante sea constante durante la Jornada de Riego.

Este efecto induce una acumulación de los riegos en las horas centrales del Jornada de Riego, y una frecuencia de caudales punta más elevada que lo que predice la formulación de Clément y Galand (1986), que se basa en la formulación original propuesta en Clément (1966).

Moreno et al (2007) usando un procedimiento heurístico (RDDC) de determinación de caudales de diseño a la demanda, basado en la simulación repetida de múltiples escenarios aleatorios de riego en que todo el tiempo de apertura de hidrante cae en la misma JER, detectaron los que los caudales máximos así estimados, para cada garantía de suministro, eran superiores a los caudales evaluados por la formulación de Clément, pero no se identificó el origen de la discrepancia ni se estudió analíticamente el problema.



En este trabajo se propone una extensión teórica de la formulación de Clément que es capaz de adaptarse a las condiciones indicadas, generando expresiones matemáticas directa y fácilmente computables.

Como ejemplo, se muestra los resultados de los caudales de diseño en un caso de bombeo directo, obtenidos usando tres diferentes métodos: formulación de Clément y Galand (1986), RDDC (generación aleatoria de curvas de demanda) propuesta por Moreno et al (2007) y finalmente la nueva formulación introducida.

## 2.- Materiales y Métodos

Se definen el tiempo reducido y la duración reducida en Eq 1, siendo JER la duración temporal en que la red esta efectivamente disponible para el riego (Jornada Efectiva de Riego),  $Q_{fc}$ , el caudal ficticio continuo,  $A$  la superficie regada y  $Dot$  la dotación del hidrante respectivo. Ambas variables son adimensionales y tienen un valor comprendido entre 0 y 1. De esa manera se facilita el estudio al manejar variables acotadas y normalizadas respecto a la JER.

$$\hat{T} = \frac{\text{tiempo transcurrido}}{JER} \quad \hat{D} = \frac{Q_{fc} \cdot A}{JER \cdot Dot}$$

Eq 1. Definición de tiempo reducido y duración reducida.

Se considera que el riego es ejecutado en las horas hábiles, que suman un tiempo JER; y de manera continua. Por eso, la única variable de decisión es la hora de apertura de cada hidrante. Se supone la existencia de una función que establece la relación entre la hora de apertura del hidrante con la duración reducida  $\hat{D}$  y el tiempo reducido  $\hat{T}$  del hidrante, que se denomina función frecuencia de comienzo de riego  $f_{cr}$ .

La probabilidad de que un hidrante de duración reducida  $\hat{D}$ , esté abierto en un instante reducido  $\hat{T}$  vendrá dada por la suma de las probabilidades de que dicho riego comience en un instante que riegue en  $\hat{T}$ , por tanto se restringe al intervalo  $[\hat{T} - \hat{D}, \hat{T}]$ . Dado que se desea un valor de probabilidad, se normaliza respecto a la suma total de la frecuencia de riego diaria, obteniendo la expresión de la Eq 2.

$$P(\hat{T}, \hat{D}) = \frac{\int_{\hat{T}-\hat{D}}^{\hat{T}} f_{cr}(\hat{t}, \hat{D}) d\hat{t}}{\int_0^1 f_{cr}(\hat{t}, \hat{D}) d\hat{t}}$$

Eq 2. Cálculo de la probabilidad de apertura de un hidrante dada una función de comienzo de riego genérica.

Se considera que la frecuencia de comienzo de riego es uniforme para aquellos instantes de tiempo que permitan ejecutar el riego de forma completa sin interrupciones. Por tanto, no se podrá comenzar a regar en instantes de superiores a  $1 - \hat{D}$  puesto que no podría completar el riego necesario para la jornada antes del comienzo de la interrupción, ni obviamente en instantes menores que 0. De modo que la función de frecuencia de comienzo de riego propuesta queda definida en la Eq 3.

$$f_{cr}(\hat{T}, \hat{D}) = \begin{cases} 0 & \text{si } \hat{T} < 0 \\ 1 & \text{si } 0 < \hat{T} < 1 - \hat{D} \\ 0 & \text{si } \hat{T} > 1 - \hat{D} \end{cases}$$

Eq 3. Función de frecuencia de comienzo de riego

Para la función de frecuencia de comienzo de riego propuesta Eq 3, existe una solución analítica a las integrales de Eq 2, obteniéndose la función de probabilidad de apertura indicada en Eq 4. En el caso de que para otras definiciones de  $f_{cr}$  no se obtenga la una función integrable analíticamente, habrá que utilizar métodos numéricos para obtener su valor.

$$P(\hat{T}, \hat{D}) = \frac{\text{Min}(1 - \hat{D}, \hat{T}) - \text{Max}(0, \hat{T} - \hat{D})}{1 - \hat{D}}$$

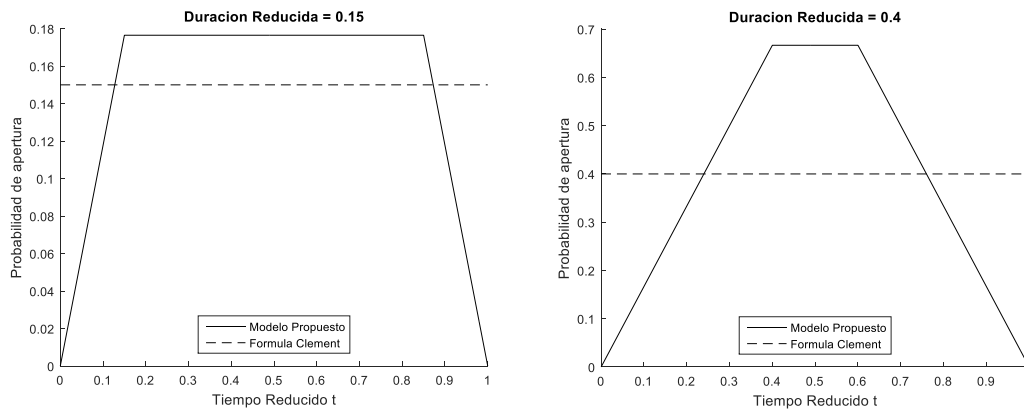
Eq 4. Probabilidad instantánea de apertura de hidrante.

En cambio, en la formulación de Clément original, la probabilidad de apertura se obtiene mediante la ecuación Eq. 5 donde se muestra que la duración reducida es equivalente a la definición de probabilidad de apertura de hidrante propuesta por Clément y utilizada tradicionalmente.

$$P_{\text{Clément}}(\hat{T}, \hat{D}) = \frac{Q_{fc} \cdot A}{\text{JER} \cdot \text{Dot}} = \hat{D}$$

Eq 5. Probabilidad de apertura de hidrante para la formulación de Clément

En la Figura 2 se muestra la probabilidad de apertura en la formulación de Clément tradicional (línea discontinua) y la propuesta (línea continua) correspondientes a la Eq 4. Tal y como se observa, la formulación propuesta predice en cualquier circunstancia una mayor probabilidad de apertura en la parte central de la jornada de riego.



**Figura 2.** Distribución de probabilidad de apertura de hidrantes. Para diferentes valores de Duración reducida: 0.15, 0.4 respectivamente

Como se puede observar, cuanto mayor es el valor de  $\hat{D}$ , mayor es la diferencia existente entre la formulación propuesta y la original de Clément. También se puede comprobar en la Eq 6 que bajo la hipótesis de baja duración reducida (tiempo de apertura de hidrante muy bajo)  $1 - \hat{D} \approx 1$ , ambas formulaciones coinciden:

$$P(\hat{T}, \hat{D}) = \frac{\text{Min}(1 - \hat{D}, \hat{T}) - \text{Max}(0, \hat{T} - \hat{D})}{1 - \hat{D}} \approx \frac{(\hat{T}) - (\hat{T} - \hat{D})}{1} \approx \hat{D}$$

Eq 6. Probabilidad de apertura bajo hipótesis de riego de baja duración

Una vez conocida la probabilidad de apertura de los hidrantes según el modelo propuesto, el siguiente paso es análogo al que se realiza en la formulación de Clément. Se realiza una aproximación de la distribución binomial de caudales a una distribución normal para cada instante de la jornada de riego. Aunque la probabilidad de apertura de hidrante varía ahora a lo largo de la jornada de riego, habrá una distribución normal de caudales para cada instante  $\hat{T}$ , tal y como se representa en la Eq 7.

$$Q(\hat{T}) \sim N[\mu(\hat{T}), \sigma(\hat{T})]$$

$$\mu(\hat{T}) = \sum_{i=1}^{nHydr} p_i(\hat{T}) \cdot Dot_i \quad \sigma(\hat{T}) = \sqrt{\sum_{i=1}^{nHydr} p_i(\hat{T}) \cdot [1 - p_i(\hat{T})] \cdot Dot_i^2}$$

Eq 7. Estadísticos (media y desviación típica) de la distribución de caudales en un tiempo T de la jornada de riego.

La función de distribución de caudales se obtiene utilizando la función de distribución de la Eq 8, que corresponde a la de la normal estándar  $N(0,1)$  por lo que será preciso utilizar la expresión de caudal tipificado de la Eq 9.

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{x^2}{2}} dx$$

Eq 8. Función de distribución de la distribución normal estándar,  $N(0,1)$

$$\frac{Q - \mu(\hat{T})}{\sigma(\hat{T})}$$

Eq 9. Expresión del caudal tipificado.

Conocida la función de distribución de caudales instantánea, es fácil hallar el caudal de diseño. Basta con encontrar el valor de  $Q_{DIS}$  para el que la probabilidad de que el caudal sea inferior iguale a la garantía de suministro deseada. Esto requiere resolver Eq 10 en la variable  $Q_{DIS}$  utilizando para ello la función de distribución de la distribución normal mostrada en la Eq 9.

$$GS = \int_0^1 \Phi\left(\frac{Q_{DIS} - \eta(\hat{t})}{\sigma(\hat{t})}\right) d\hat{t}$$

Eq 10. Cálculo del caudal de diseño  $Q_{DIS}$  de una tubería conocida su distribución de caudales  $N(\eta(\hat{t}), \sigma(\hat{t}))$

Puesto que no existe solución analítica a la Eq 10, se recurre a métodos numéricos para su resolución que se pueden consultar en Chapra y Canale (2007);

Se utiliza el *Método de la Falsa Regla* que combina el *Método de la Secante* y el de la *Bisección*. La ventaja de este método es que combina la velocidad de convergencia del método de la secante con la convergencia asegurada del método de la bisección. Los valores de inicialización escogidos se muestran en la Eq 11 y

corresponden a caudal nulo y caudal acumulado de la red, que se corresponden a los valores mínimo y máximo de caudal admisible.

$$Q_{Dis} = 0 \quad Q_{Dis} = \sum_{i=1}^{nHydr} Dot_i$$

Eq 11. Inicialización de caudales

Será preciso evaluar sucesivas veces la integral de la Eq 10. Para ello, se ha utilizado el *Método de Simpson Adaptativo* que garantiza un error acotado. Para el cálculo de  $\Phi$  se han utilizado valores tabulados, si bien se podría obtener mediante integración numérica de la Eq 8.

Por último, hay que tener en cuenta que la aproximación, de la distribución binomial a la normal, es válida cuando el número de hidrantes aguas abajo suficientemente elevado y el valor de la probabilidad de apertura instantánea no está excesivamente próximo a 0 ni a 1. Según se observa en la Figura 1, tanto al comienzo como al final de la jornada de riego, la probabilidad de apertura es muy baja, independientemente de la duración reducida del hidrante, lo que puede provocar un cierto sesgo en la estimación de los caudales. Sin embargo, a la hora de establecer caudal de diseño se puede considerarse este factor despreciable porque su contribución a la integral de la Eq 10. es muy baja comparada con la del resto de la jornada.

### 3- Resultados y Discusión

Se presentan los resultados de la aplicación del modelo expuesto en el apartado anterior a un caso ejemplo, basado en una red tipo que el paquete informático para diseño y gestión de riegos presurizados, GESTAR2014 ([www.gestarcad.com](http://www.gestarcad.com)), utiliza en sus tutoriales. En la Figura 3 dicha red se muestra esquemáticamente.

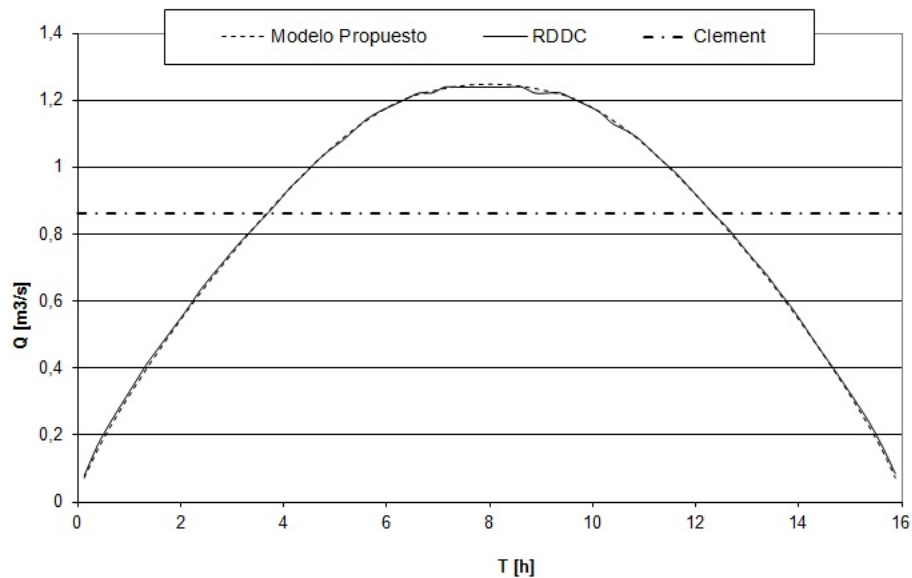


**Figura 3.** Esquema de la red utilizada para la comparación entre modelos.

La red es estrictamente ramificada y consta de 94 hidrantes con un caudal total instalado de  $1.54 \text{ m}^3/\text{s}$ . Se utilizarán también los modelos de Clément tradicional y el

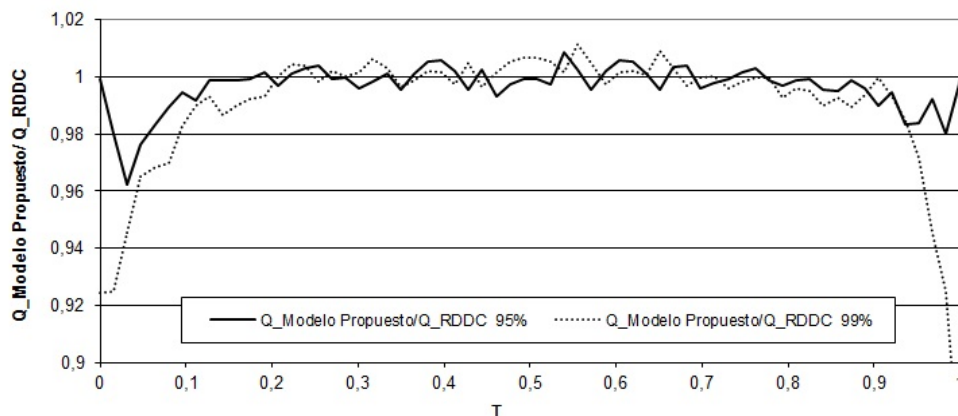
procedimiento RDDC, que se ha reproducido mediante la herramienta de generación de programaciones de riego aleatorias del paquete GESTAR 2014, con 100 simulaciones por hidrante, que hacen un total de 9.400.

En primer lugar, en la Figura 4, se muestra una comparativa entre el caudal de diseño de la conducción de cabecera según el tiempo de la JR, para cada uno de los modelos considerando una garantía de suministro del 99%. No se ha incluido la gráfica para una Garantía de Suministro del 95% porque eran incluso más parejas si cabe.



**Figura 4.** Distribución diaria de caudales de diseño en la cabecera para una Garantía de Suministro del 99%.

Se observa una gran similitud entre el resultado obtenido utilizando el procedimiento de simulaciones repetidas RDDC y el modelo conceptual planteado. Para observar mejor la equivalencia entre ambos, se adjunta en la Figura 4 la relación entre ambas predicciones para una garantía de suministro del 95% y 99%.



**Figura 5.** Ratio entre el caudal de diseño de la cabecera de la red calculado con de modelo conceptual propuesto y con el método RDDC para el caso ejemplo, a lo largo del tiempo reducido.



Se observa que son muy parejos en toda la parte central de la jornada de riego. Mientras que en la parte inicial  $\hat{T} < 0.1$  y final  $\hat{T} > 0.9$  se aprecian los efectos de la frontera temporal.

El modelo propuesto conduce a funciones de probabilidad de caudal que generan mayores caudales de diseño que los encontrados con la formulación tradicional de Clément para las mismas condiciones, siendo los primeros presumiblemente más realistas, y equivalentes a los encontrados por el procedimiento RDDC.

Además, la formulación propuesta aporta ventajas adicionales:

Establece un modelo teórico conceptual, que se explica bajo hipótesis sencillas y plausibles, y que conduce racionalmente a resultados demostrados rigurosamente.

Se obtienen expresiones analíticas y computables directamente que evitan incurrir en una compleja simulación de cientos o miles de escenarios y la reducción simultánea de datos.

El modelo permite su extensión y generalización para reproducir diferentes sesgos en el uso de la red mediante funciones de frecuencia de comienzo de riego adecuadas y más sofisticadas.

#### **4.- Bibliografía**

Chapra S., Canale R. (2007) Métodos Numéricos para Ingenieros 5ª Edición, Mc Graw Hill. Capítulos 5, 6, 22. Epílogo parte 6.

Clement, R. (1966) Calcul des débits dans les réseaux d'irrigation fonctionnant a la demande. La Houille Blanche, 5.

Clément, R., Galand, A., (1986). El riego por aspersión y las redes colectivas de distribución a presión. Editores Técnicos Asociados.

Moreno, M., Planells, P., Ortega, J., Tarjuelo, J. (2007). New Methodology to Evaluate Flow Rates in On-Demand Irrigation Networks. J. Irrig. Drain Eng., 133(4), 298–306.



## MÉTODO ALTERNATIVO DE ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE VARIACIÓN DE UN EMISOR DE RIEGO LOCALIZADO

*Turégano Pastor, J.V. (1) (P), Martí Pérez, P. (2), Royuela Tomás, A. (3)*

<sup>1</sup> Profesor, Universitat Politècnica de València, Departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria (DIRA), Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, [jturegan@agf.upv.es](mailto:jturegan@agf.upv.es)

<sup>2</sup> Investigador, Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries (IRTA), Edifici Fruitcentre, PCiTAL Parc de Gardeny, 25003 Lleida, [paumarpe@etsia.upv.es](mailto:paumarpe@etsia.upv.es)

<sup>3</sup> Profesor, Universitat Politècnica de València, Centro Valenciano de Estudios del Riego (CVER), Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, [aroyuela@agf.upv.es](mailto:aroyuela@agf.upv.es)

### Resumen

El Coeficiente de Variación de fabricación de un emisor CV se determina según la Norma UNE-EN-ISO-9261 a partir de un único ensayo de laboratorio. Este procedimiento puede conllevar la no correcta determinación del CV, ya que en el ensayo los errores de medida atribuibles a los equipos o al proceso de medición pueden provocar la aparición de datos anómalos difíciles de detectar, además de que el CV así obtenido sólo sería válido para la presión de ensayo. En el presente trabajo se utilizan los resultados de los ensayos de 5 emisores no autocompensantes y 5 autocompensantes sometidos a diferentes presiones dentro del rango de trabajo de los mismos, y con ellos se determinan los caudales y los coeficientes de variación reales para cada presión y se ajustan unas funciones de predicción del caudal medio y del caudal emitido por cada emisor individual. A partir de estas funciones, se pueden calcular los caudales y los coeficientes de variación predichos para cada presión. Además, también se proponen unas funciones de ajuste para predecir la evolución del CV con la presión, tanto para los valores de caudal reales como para los predichos. Las principales conclusiones son que el CV en general depende de la presión para cualquier tipo de emisores y que el modelo propuesto de predicción de los caudales y del CV es correcto y consigue reducir el efecto de los posibles datos de caudal anómalos que aparecen en los ensayos.

### 1. Introducción y objetivos

Un emisor de riego localizado es un dispositivo que permite aportar pequeños caudales de agua al suelo, produciendo una gran caída de presión mediante laberintos o a través de toberas u orificios con secciones de paso del agua de muy pequeño tamaño y muy sensibles a la obturación (Keller & Karmeli, 1974). Como es difícil analizar el régimen hidráulico que se da en el interior de los laberintos, dadas su complejidad y pequeña dimensión, es necesario adoptar un modelo de comportamiento hidráulico para los emisores que permita predecir el caudal arrojado como una función de la presión de entrada al mismo (Demir, Yurdem & Degirmencioglu, 2007).

El modelo comúnmente adoptado es una ecuación de tipo potencial, como la propuesta por la Norma UNE-EN-ISO 9261 (AENOR, 2010), que relaciona el caudal emitido  $q$  (l/h) con la presión de entrada  $h$  (MPa) mediante un coeficiente de descarga  $K$  y un exponente  $x$  de la siguiente forma:

$$q = K \cdot h^x$$

Esta expresión es válida para emisores *no autocompensantes* porque refleja muy bien su comportamiento hidráulico real, pero en general no es apropiada para emisores *autocompensantes*, tal como establecen Royuela y Turégano (2012) y Turégano (2014).

Otro parámetro importante a la hora de definir el comportamiento de los emisores es el denominado Coeficiente de Variación de Fabricación (*CV*), que es un término usado para describir la variación de los caudales de una muestra de emisores nuevos sometidos a una presión dada (Karmeli & Keller, 1975).

El *CV* se calcula a partir de los caudales recogidos en un ensayo de laboratorio realizado sobre una muestra de emisores y su expresión es:

$$CV = \frac{\sigma_q}{\bar{q}}$$

Siendo:

- $\sigma_q$ : Desviación típica de los caudales emitidos, en l/h
- $\bar{q}$ : Promedio de los caudales emitidos, en l/h

El procedimiento que establece la Norma UNE-EN-ISO para la obtención del *CV* de un emisor consiste en la realización de un único ensayo de laboratorio en el que se somete a una muestra de 25 emisores a su presión nominal si son no autocompensantes y a la presión media del intervalo de compensación si se trata de emisores autocompensantes.

Esta metodología puede no ser adecuada en muchos casos porque:

- a) Al realizar solo un ensayo, los errores de medida atribuibles a los equipos o al proceso de medición pueden provocar la aparición de datos anómalos difíciles de detectar y que pueden influir mucho en el valor de *CV*.
- b) Se determina un único valor de *CV*, no teniéndose en cuenta su posible variación con la presión.

Con el presente trabajo se pretende establecer un nuevo método de estimación del *CV* de un emisor que reduzca, en la medida de lo posible, las incertidumbres asociadas al procedimiento de ensayo y que permita analizar todo el rango de presiones de trabajo del emisor, estableciendo la relación de *CV* con la presión.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Emisores ensayados

Se han ensayado 5 emisores no autocompensantes y 5 emisores autocompensantes en el banco de ensayo de emisores del Laboratorio de Riego Localizado del Departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria de la Universitat Politècnica de València. El procedimiento de ensayo se basó parcialmente en la Norma UNE-EN-ISO 9261 pero fue adaptado a los objetivos y requerimientos del presente trabajo. Se omiten las denominaciones comerciales por razones de confidencialidad.

Así, los emisores no autocompensantes fueron sometidos a cinco niveles de presión distintos: 50, 100, 150, 200 y 250 kPa, considerándose su presión nominal 100 kPa.

Por su parte, los emisores autocompensantes fueron sometidos a siete niveles de presión distintos: 100, 150, 200, 250, 300, 350 y 400 kPa. En todos los casos se desestimó el nivel propuesto por la norma de 50 kPa al comprobarse que se quedaba fuera del rango de regulación propuesto por los fabricantes y se limitó a 400 kPa como presión máxima que puede soportar una tubería de polietileno según la norma UNE 53367 (AENOR, 2012). Para estos emisores, la presión nominal es la presión media del intervalo de compensación considerado, es decir, 250 kPa.

## 2.2. Comportamiento hidráulico de los emisores: Predicción del caudal arrojado

El caudal arrojado es la respuesta de los emisores de riego a la presión de entrada a los mismos. Esta respuesta puede asimilarse a una función matemática que permite predecir el caudal para cualquier presión dada dentro del intervalo de presiones de funcionamiento.

Pero la función matemática, que representa el modelo de comportamiento hidráulico, no puede ser la misma para los emisores no autocompensantes y los autocompensantes. Esto es debido a que los primeros disipan la presión mediante laberintos de largo recorrido o a través de toberas u orificios (Keller & Karmeli, 1974), mientras que los segundos disponen de un elemento elastomérico móvil cuya geometría y configuración es muy variable (Solomon, 1979) y considerablemente distintas de las de los emisores no autocompensantes.

Por ello, se van a adoptar dos funciones:

- a) Función potencial: Para emisores *no autocompensantes*
- b) Función parabólica (polinomio de segundo grado): Para emisores *autocompensantes*.

La Norma UNE-EN-ISO 9261 (AENOR, 2010) contempla la función potencial para cualquier tipo de emisor, pero la obtiene para el conjunto de los 25 emisores ensayados, es decir, para el caudal medio recogido en cada nivel de presión considerado.

No obstante, dada la previsible variabilidad de los caudales de los diferentes emisores, resulta más interesante obtener las funciones de ajuste para cada emisor individual de manera que se pueda predecir el caudal de cada uno de ellos para cada presión.

Así, las funciones de predicción del caudal, obtenidas mediante ajuste por mínimos cuadrados, son:

**Tabla 1:** Modelos adoptados para las funciones de predicción del caudal

Tipo de emisor	Caudal individual	Caudal promedio
No autocompensante	$q_{ij} = K_i \cdot h_j^{x_i}$	$\bar{q}_j = K \cdot h_j^x$
Autocompensante	$q_{ij} = A_i + B_i \cdot h_j + C_i \cdot h_j^2$	$\bar{q}_j = A + B \cdot h_j + C \cdot h_j^2$

Siendo:

- $q_{ij}$ : Caudal del emisor  $i$  sometido a cierta presión  $h_j$ , en l/h
- $\bar{q}_j$ : Media de los caudales de los emisores sometidos a cierta presión  $h_j$ , en l/h
- $h_j$ : Presión de entrada a los emisores, en MPa
- $K_i, x_i$ : Coeficiente y exponente de la función potencial de ajuste individual

- K, x: Coeficiente y exponente de la función potencial de ajuste del conjunto de los emisores.
- A<sub>i</sub>, B<sub>i</sub>, C<sub>i</sub>: Coeficientes de la función parabólica de ajuste individual
- A, B, C: Coeficientes de la función parabólica de ajuste del conjunto de emisores

Con este planteamiento se dispone de más información, ya que para cada emisor individual se dispone de dos datos de caudal, uno el realmente obtenido en el ensayo y otro el predicho al aplicar la función de ajuste individual.

### 2.3. Obtención del coeficiente de variación de fabricación, CV

El Coeficiente de Variación de fabricación CV es un indicador de la calidad de fabricación del emisor puesto que recoge la variabilidad relativa de los caudales emitidos por una muestra de emisores del mismo lote sometidos a la misma presión.

La norma UNE-EN-ISO 9261 define un único valor para el CV de un emisor dado, sin tener en cuenta el rango de presiones de trabajo del emisor y su posible influencia en el valor de aquél. Por eso, en el presente trabajo se definen otros CV como alternativa al normativo y que suponen una aproximación más realista a las condiciones de trabajo de un emisor en campo.

Dado que se dispone de los valores de los caudales de todos los emisores para todos los niveles de presión ensayados, es inmediato calcular el CV para cada nivel de presión  $h_j$ .

$$CV_j = \frac{\sigma_{q_i}}{q_j} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (q_{ij} - \bar{q}_j)^2}{n-1}}}{\frac{\sum_{i=1}^n q_{ij}}{n}}$$

Donde  $n$  es el número de unidades de un mismo emisor ensayadas (es decir, el tamaño de la muestra) y  $j$  representa el nivel de presión considerado.

El valor de  $q_{ij}$  es el caudal correspondiente a cada unidad de emisor  $i$  para la presión dada  $h_j$ , pero como se comentó anteriormente, se puede considerar o bien el caudal realmente recogido en el ensayo o bien el caudal predicho por la función matemática de ajuste que a su vez depende del caudal real. En otras palabras, se pueden definir dos CV distintos según se tomen los caudales reales o los predichos.

$$CV_{j\text{-real}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (q_{ij\text{-real}} - \bar{q}_{j\text{-real}})^2}{n-1}}}{\frac{\sum_{i=1}^n q_{ij\text{-real}}}{n}} \qquad CV_{j\text{-predicho}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (q_{ij\text{-predicho}} - \bar{q}_{j\text{-predicho}})^2}{n-1}}}{\frac{\sum_{i=1}^n q_{ij\text{-predicho}}}{n}}$$

Es de prever que haya diferencias entre estos dos valores para una misma presión, tanto por la incertidumbre inherente al procedimiento de ensayo que puede provocar la aparición de datos anómalos como por la no adecuación de la función de ajuste al comportamiento hidráulico real de los emisores.

Es decir, suponiendo  $p$  niveles de presión  $h_j$ , se dispone de  $p$  valores de  $CV_{real}$  y  $p$  valores de  $CV_{predicho}$  que permiten apreciar si el Coeficiente de Variación de un emisor varía significativamente con la presión o no. Además, igual que se hace con el caudal de los emisores, también es posible intentar establecer una función de ajuste que relacione el CV con la presión. Con ello, se podría estimar de forma continua el CV para cualquier presión dada dentro del intervalo considerado aunque no fuese una de las presiones de ensayo fijadas. Para ello, se propone buscar una función de ajuste *potencial* para los emisores no autocompensantes y una función de ajuste *parabólica* para los emisores no autocompensantes, suponiendo que si el caudal responde a ese tipo de funciones, el CV que se obtiene de este, también responderá a ellas.

Así pues, se definen los  $CV_{ensayo}$  y  $CV_{predicho}$  de la siguiente manera:

**Tabla 2:** Funciones de ajuste del coeficiente de variación CV

Tipo emisor	Datos de ensayo	Datos predichos
No autocompensante	$CV_{ensayo} = L_{ensayo} \cdot h^{m_{ensayo}}$	$CV_{predicho} = L_{predicho} \cdot h^{m_{predicho}}$
Autocompensante	$CV_{ensayo} = D_{ensayo} + E_{ensayo} \cdot h + F_{ensayo} \cdot h^2$	$CV_{predicho} = D_{predicho} + E_{predicho} \cdot h + F_{predicho} \cdot h^2$

Siendo:

- $L_{ensayo}$ ,  $L_{predicho}$ ,  $m_{ensayo}$  y  $m_{predicho}$  los coeficientes y exponentes de las funciones potenciales de ajuste de  $CV_{ensayo}$  y  $CV_{predicho}$ , respectivamente.
- $D_{ensayo}$ ,  $E_{ensayo}$ ,  $F_{ensayo}$ ,  $D_{predicho}$ ,  $E_{predicho}$  y  $F_{predicho}$  los coeficientes de las funciones parabólicas de ajuste de  $CV_{ensayo}$  y  $CV_{predicho}$ , respectivamente.

Adicionalmente, pueden calcularse otros valores de CV representativos del emisor como son:

- a) CV medio para todo el intervalo de presiones de trabajo a partir de los valores discretos:

$$\overline{CV}_{discreto} = \frac{\sum_{j=1}^p CV_j}{p}$$

- b) CV medio para todo el intervalo de presiones de trabajo a partir de la función de ajuste considerada:

$$\overline{CV}_{continuo} = \frac{1}{h_{m\acute{a}x} - h_{m\acute{i}n}} \int_{h_{m\acute{i}n}}^{h_{m\acute{a}x}} CV(h) \cdot dh$$

- c) CV según la norma UNE-EN-ISO 9261,  $CV_{9261}$ :

$$CV_{9261} = CV(h_{nominal})$$

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1. Resultados de los ensayos

De los ensayos en laboratorio de los 5 emisores no autocompensantes y los 5 emisores autocompensantes se obtienen los siguientes resultados:

- Funciones de predicción del caudal medio.
- Funciones de predicción de los caudales individuales de cada emisor.
- Coeficientes de variación del emisor para cada nivel de presión, tanto para los caudales reales como para los caudales predichos con las funciones individuales.
- Funciones de predicción del Coeficiente de variación del emisor para resultados de ensayo.
- Funciones de predicción del Coeficiente de variación del emisor para los resultados predichos.
- Coeficientes de variación representativos del emisor para los resultados de ensayo.
- Coeficientes de variación representativos del emisor para los resultados predichos.

En algunos emisores se constató la presencia de datos anómalos al realizar una representación de los datos en papel probabilístico normal, por lo que en esos casos el emisor se considera dos veces, la primera con los datos anómalos y la segunda sin ellos. Para distinguirlos se le sumará a la denominación de los primeros la letra “a”. Por eso se van a analizar realmente los resultados de 7 casos de emisores no autocompensantes (Noauto-1a, Noauto-1, Noauto-2, Noauto-3, Noauto-4, Noauto-5a y Noauto-5) y 9 casos de emisores autocompensantes (Auto-1, Auto-2a, Auto-2, Auto-3a, Auto-3, Auto-4a, Auto-4, Auto-5a y Auto-5)

En la Tabla 3 y la Tabla 4 se dan los coeficientes de ajuste y los coeficientes de correlación al cuadrado tanto para las funciones de ajuste del caudal medio como para las funciones de ajuste del coeficiente de variación, para los emisores no autocompensantes y para los emisores autocompensantes ensayados, respectivamente.

**Tabla 3:** Funciones de ajuste del caudal medio y el CV para emisores no autocompensantes

Emisor	Ajuste del caudal medio, $q$			Ajuste del coeficiente de variación, CV			
	K	x	R <sup>2</sup>		L	m	R <sup>2</sup>
Noauto 1a	12,321	0,4972	0,9998	Ensayo	1,481	-0,218	0,6114
				Predicho	1,454	-0,232	0,9998
Noauto 1	12,341	0,4956	0,9997	Ensayo	1,263	-0,115	0,7590
				Predicho	1,234	-0,126	0,9922
Noauto 2	13,298	0,5252	0,9999	Ensayo	1,332	0,163	0,4360
				Predicho	1,301	0,155	0,9869
Noauto 3	7,195	0,5096	0,9998	Ensayo	2,389	-0,021	0,7105
				Predicho	2,389	-0,021	0,9995
Noauto 4	12,817	0,5095	0,9998	Ensayo	1,937	-0,009	0,4676
				Predicho	1,935	-0,009	0,9890
Noauto 5a	6,945	0,5326	1,0000	Ensayo	2,638	-0,164	0,1982
				Predicho	2,482	-0,204	0,9988
Noauto 5	6,948	0,5305	0,9999	Ensayo	2,975	0,035	0,0762
				Predicho	2,964	0,032	0,9132



**Tabla 4:** Funciones de ajuste del caudal medio y el CV para emisores autocompensantes

Emisor	Ajuste del caudal medio, $q$				Ajuste del coeficiente de variación, CV				
	A	B	C	R <sup>2</sup>		D	E	F	R <sup>2</sup>
Auto 1	2,404	-1,634	3,243	0,84	Ensayo	2,613	-6,459	15,055	0,69
					Predicho	3,105	-11,579	25,442	0,93
Auto 2a	3,499	10,123	-17,567	0,95	Ensayo	20,747	-93,714	143,61	0,98
					Predicho	21,752	-104,95	166,25	1,00
Auto 2	3,620	9,863	-17,315	0,95	Ensayo	17,785	-80,622	119,18	0,99
					Predicho	17,653	-80,236	118,72	1,00
Auto 3a	3,871	-0,124	2,768	0,87	Ensayo	2,135	-7,942	23,884	0,89
					Predicho	1,993	-5,485	17,433	0,98
Auto 3	3,829	-0,189	3,091	0,95	Ensayo	1,667	-2,507	12,175	0,90
					Predicho	1,697	-3,096	13,500	0,97
Auto 4a	2,081	-0,139	1,172	0,89	Ensayo	2,964	0,792	-2,529	0,15
					Predicho	4,078	-6,494	8,354	0,97
Auto 4	2,051	-0,232	1,529	0,93	Ensayo	1,991	-2,345	9,509	0,79
					Predicho	2,307	-5,356	15,221	0,89
Auto 5a	3,705	-3,223	6,094	0,89	Ensayo	1,009	6,092	-7,624	0,46
					Predicho	2,204	-7,312	20,282	0,90
Auto 5	3,700	-3,141	5,912	0,92	Ensayo	1,523	-1,616	9,502	0,82
					Predicho	2,462	-11,638	29,884	0,88

**Tabla 5:** Funciones de ajuste de los caudales de los emisores individuales. Ejemplo de emisor no autocompensante (izda.) y emisor autocompensante (dcha.)

No autocompensante (Noauto-1a)				Autocompensante (Auto-3a)				
Emisor	K <sub>i</sub>	x <sub>i</sub>	R <sup>2</sup>	Emisor	A <sub>i</sub>	B <sub>i</sub>	C <sub>i</sub>	R <sup>2</sup>
1	12,488	0,495	0,9997	1	3,859	0,173	2,706	0,8705
2	12,140	0,495	0,9997	2	3,966	-0,181	2,502	0,8171
3	12,378	0,496	0,9997	3	3,880	-1,098	5,488	0,9449
4	12,377	0,496	0,9997	4	3,996	-0,589	3,928	0,7337
5	12,199	0,493	0,9996	5	3,780	-0,287	2,229	0,7846
6	12,531	0,497	0,9997	6	3,930	-0,372	3,105	0,8647
7	12,271	0,495	0,9997	7	3,869	0,197	2,281	0,8836
8	12,141	0,501	0,9998	8	3,679	0,964	0,352	0,6113
9	11,898	0,513	0,9970	9	3,773	0,822	1,084	0,9021
10	12,054	0,486	0,9994	10	3,952	-0,876	3,766	0,8562
11	12,208	0,496	0,9997	11	3,735	0,625	1,452	0,8376
12	12,524	0,495	0,9997	12	3,790	0,644	2,046	0,9101
13	12,210	0,495	0,9997	13	3,899	0,002	2,607	0,8618
14	12,277	0,495	0,9997	14	3,956	-0,707	4,234	0,8998
15	12,682	0,495	0,9998	15	3,877	0,155	2,348	0,9152
16	12,402	0,495	0,9997	16	3,865	0,015	2,719	0,9095
17	12,489	0,493	0,9997	17	3,795	-0,120	2,469	0,8423
18	12,201	0,491	0,9996	18	3,998	-0,853	3,638	0,8134
19	12,370	0,498	0,9997	19	3,973	-0,411	3,746	0,8779
20	12,628	0,492	0,9997	20	3,750	1,045	1,302	0,8547
21	12,143	0,495	0,9998	21	4,045	-1,507	3,503	0,4059
22	12,617	0,500	0,9996	22	4,040	-0,918	3,116	0,8668
23	12,178	0,494	0,9997	23	3,925	-0,862	3,783	0,8054
24	12,351	0,511	0,9999	24	3,727	0,699	2,128	0,9251
25	12,297	0,521	0,9995	25	3,714	0,332	2,657	0,9676
<b>Promedio</b>	12,322	0,497		<b>Promedio</b>	3,871	-0,124	2,768	

## 3.2. Funciones de predicción del caudal de los emisores

### 3.2.1. Emisores no autocompensantes

A la vista de los resultados expuestos en la Tabla 3, se comprueba que el modelo de función potencial adoptado es perfectamente válido para todos los casos. Es decir, explica la práctica totalidad de los datos medios observados al obtenerse  $R^2$  muy próximos a la unidad.

De manera análoga, se pueden hacer ajustes individuales para cada elemento emisor ensayado, obteniendo tantas funciones de ajuste como emisores componen la muestra.

Analizado los resultados obtenidos expuestos en la Tabla 5 se observa que dichos ajustes individuales también son muy buenos, en virtud de los coeficientes de correlación  $R^2$  calculados. No obstante, se aprecian ciertas diferencias entre los valores de los coeficientes  $K_i$  y los exponentes  $x_i$  de los diferentes emisores individuales, que son precisamente las que originan la variabilidad de los caudales emitidos. Esto contrasta con lo expuesto por Bralts et al. (1981) quienes consideraban que la variabilidad de los emisores debida al proceso de fabricación se podía asignar completamente a la variabilidad del coeficiente  $K_i$  dado que el exponente  $x$  se mantendría constante.

También se constata que el valor medio de  $x_i$  coincide exactamente con el valor de  $x$  para el ajuste del caudal medio pero el valor medio de  $K_i$  difiere levemente del valor de  $K$  para el ajuste del caudal medio, tal como demostró Turégano (2014).

### 3.2.2. Emisores no autocompensantes

En este tipo de emisores el modelo de comportamiento hidráulico consiste en una función polinómica de grado 2 (función parabólica). Los resultados obtenidos para las funciones de ajuste del caudal medio con la presión, figuran en la Tabla 4.

Atendiendo a los valores de  $R^2$  el modelo parabólico adoptado para los emisores autocompensantes no predice tan bien el caudal emitido como lo hacía el modelo potencial para los emisores no autocompensantes. No obstante, la función parabólica se ajusta mucho mejor que la función potencial para los emisores autocompensantes.

En cuanto a los ajustes individuales de cada unidad emisora (Ver Tabla 5), se demuestra que el modelo parabólico también es apropiado aunque hay gran variabilidad en los diferentes valores de  $A_i$ ,  $B_i$  y  $C_i$ .

Por otra parte, se constata que los promedios de  $A_i$ ,  $B_i$  y  $C_i$  coinciden exactamente con los valores de  $A$ ,  $B$  y  $C$  obtenidos para el ajuste de los caudales medios, corroborando lo expuesto por Turégano (2014).

## 3.3. Coeficientes de variación de fabricación, CV

### 3.3.1. Variación con la presión

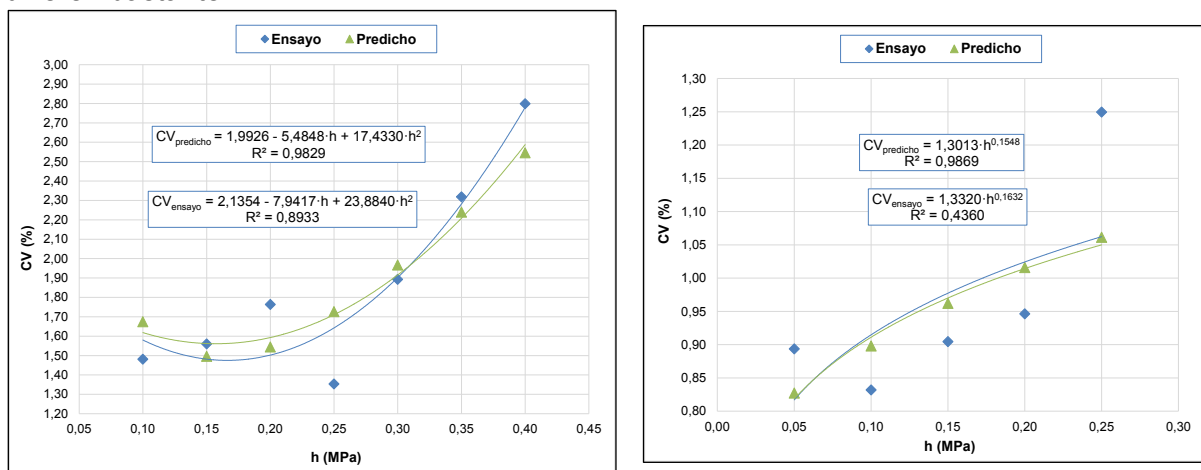
En general se observa que el coeficiente de variación de fabricación  $CV$  en las dos formas propuestas (ensayo y predicho) varía con la presión, tanto para emisores no autocompensantes como autocompensantes. Esto contrasta con la establecido por Bralts et al. (1981) o por Rodrigo et al. (1997). Además, la mayor parte de las propuestas que tienen

relación con el cálculo de la uniformidad de distribución en sus diferentes formatos o con el diseño hidráulico de subunidades, se basan en la constancia de dicho parámetro (Karmeli y Keller 1975, Bralts et al. 1987, Burt et al. 1997, Ascough y Kiker 2002, Barragan et al. 2006, Noori y Al Thamiry 2012, Zhang et al. 2013).

Si se analizan los valores concretos del CV para cada una de las presiones de ensayo, se aprecia cierta diferencia entre los valores procedentes del propio ensayo y los valores predichos. Esto en principio no permitiría establecer una tendencia de variación del CV con la presión, al menos para los CV de ensayo. Pero si se modeliza dicha variación mediante una función potencial para los emisores no autocompensantes o una función parabólica para los emisores autocompensantes sí que es posible predecir la citada tendencia.

Así, a la vista de los resultados expuestos en la Tabla 3, la Tabla 4 y la Figura 1, se aprecia que las funciones de ajuste de los  $CV_{predicho}$  presentan valores de  $R^2$  claramente superiores a las de las funciones de ajuste de los  $CV_{ensayo}$ . Esto se debe a que los errores de medida inherentes a los procedimientos y métodos de ensayo no se manifiestan en el cálculo del  $CV_{predicho}$ , que se realiza a partir de las funciones de ajuste individuales de los emisores.

No obstante, la representación gráfica de las funciones de ajuste pone de manifiesto que las curvas correspondientes a los  $CV_{predicho}$  y  $CV_{ensayo}$  son prácticamente coincidentes (Ver Figura 1), a pesar de que el coeficiente  $L$  y el exponente  $m$  para la función potencial y los coeficientes  $D$ ,  $E$  y  $F$  para la función parabólica en uno y otro caso aparentemente difieren bastante.



**Figura 1:** Ejemplo de variación de CV con la presión para el emisor autocompensante *Auto-3a* (izda.) y el emisor no autocompensante *Noauto-2* (dcha.)

Por otra parte, en el caso de los emisores autocompensantes, se comprueba que los mejores ajustes para las funciones parabólicas del CV se dan cuando los ajustes de las funciones parabólicas para el caudal también son los mejores. Esto puede constatare por ejemplo en el caso del emisor *Auto 2a* que tiene un  $R^2$  para el ajuste del CV de 0,9781 y un  $R^2$  para el ajuste del caudal de 0,9471. En definitiva, cuanto mejor explica el modelo parabólico el caudal emitido, mejor explica el modelo parabólico la evolución del CV con la presión.

### 3.3.2. Comparativa entre los diferentes CV representativos del emisor

En la tabla siguiente se incluyen todos los CV representativos de un emisor obtenidos de la forma expuesta en la sección Materiales y métodos tanto para los resultados de los ensayos como para los caudales predichos según las funciones de ajuste individuales de los emisores.

**Tabla 6:** Coeficientes de variación representativos de los emisores

Emisor		$\overline{CV}_{\text{continuo}}$		$\overline{CV}_{\text{discreto}}$		$CV_{9261}$	
		Ensayo	Predicho	Ensayo	Predicho	Ensayo	Predicho
No autocomp.	Noauto 1a	2,293	2,315	2,340	2,353	2,447	2,480
	Noauto 1	1,587	1,588	1,602	1,598	1,649	1,645
	Noauto 2	0,966	0,959	0,965	0,953	0,915	0,911
	Noauto 3	2,491	2,491	2,494	2,493	2,507	2,508
	Noauto 4	1,972	1,970	1,974	1,973	1,978	1,976
	Noauto 5a	3,662	3,735	3,855	3,915	3,848	3,970
	Noauto 5	2,777	2,783	2,761	2,764	2,746	2,755
Autocomp.	Auto 1	2,052	1,991	2,090	2,055	1,939	1,801
	Auto 2a	7,371	7,153	7,730	7,568	6,294	5,906
	Auto 2	5,972	5,904	6,270	6,201	5,078	5,014
	Auto 3a	1,822	1,842	1,882	1,885	1,643	1,711
	Auto 3	1,893	1,868	1,923	1,902	1,801	1,767
	Auto 4a	2,985	3,039	2,978	3,060	3,004	2,977
	Auto 4	2,070	2,033	2,094	2,071	1,999	1,919
	Auto 5a	1,998	1,796	1,979	1,846	2,055	1,643
Auto 5	1,784	1,644	1,808	1,719	1,713	1,420	

En casi todos los casos se observa muy poca diferencia entre los valores de CV obtenidos del ensayo u obtenidos a partir de la predicción de los caudales. Esto significa que la consideración de las funciones de ajuste individuales de cada emisor, utilizadas para calcular los caudales predichos, también permite predecir el CV con fiabilidad.

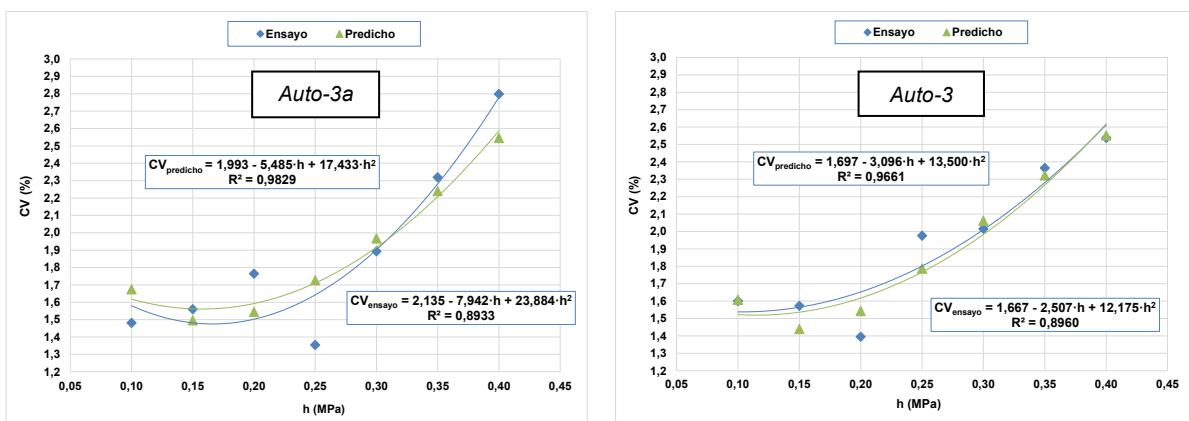
Comparando los valores medios,  $\overline{CV}_{\text{continuo}}$  y  $\overline{CV}_{\text{discreto}}$  en el rango de presiones considerado, se aprecia poca diferencia para la mayoría de los emisores, tanto no autocompensantes como autocompensantes (excepto para el Noauto 5a, Auto 2a y Auto 2). Teniendo en cuenta que el  $\overline{CV}_{\text{continuo}}$  se calcula utilizando la función de ajuste del CV con la presión y que el  $\overline{CV}_{\text{discreto}}$  se calcula con los valores de CV para cada nivel de presión de ensayo, se puede colegir que el modelo propuesto para predecir la variación del CV con la presión es adecuado.

En lo que respecta al  $CV_{9261}$  (que se ha calculado a partir de las funciones de ajuste del CV propuestas), se ve que en general difiere de los valores medios antes mencionados, siendo esta diferencia mucho más acusada para los emisores autocompensantes. La influencia de estas desviaciones no es importante para los emisores no autocompensantes, ya que las subunidades de las que forman parte se suelen diseñar para que la presión media sea la nominal y las variaciones relativas de presión no excedan del 20%, pero sí que lo es para los autocompensantes, puesto que las subunidades constituidas por ellos se p de manera que se cubra todo el intervalo de presiones de compensación por lo que el  $CV_{9261}$  no sería la referencia adecuada para establecer el CV representativo del emisor.

### 3.3.3. Influencia de la presencia de datos anómalos

Como se puede ver en la Figura 2, la presencia de emisores con datos de caudal anómalos hace que en general el CV sea más elevado ya que dichos datos modifican sustancialmente el valor de las desviaciones típicas. Además, también provoca mayores diferencias entre los valores predichos y los valores de ensayo.

Al rehacer los cálculos sin los emisores con datos anómalos, se observa una mayor modificación de los CV de ensayo (tanto de los valores observados para cada nivel de presión como para la función de ajuste parabólica correspondiente), que de los CV obtenidos con los caudales predichos. Por tanto, en los casos en que sea difícil detectar datos anómalos, es mejor utilizar los valores predichos de caudal individual de cada emisor para determinar el coeficiente de variación  $CV_{predicho}$  así como su función de ajuste, porque se reduce la influencia de aquéllos.



**Figura 2:** Ejemplo de funciones de ajuste del CV para un emisor autocompesante. Con datos anómalos (izda.) y sin datos anómalos (dcha.)

## 4. Conclusiones y recomendaciones

A la vista de los resultados, es posible enumerar las siguientes conclusiones:

- La función potencial de ajuste es un buen modelo de predicción del caudal emitido para los emisores no autocompensantes pero no para los autocompensantes en los que el mejor modelo de predicción del caudal emitido es el de la función parabólica. Esto se cumple tanto para el caudal medio de una muestra de emisores como para el caudal individual de cada elemento.
- Para los emisores no autocompensantes, el coeficiente  $K$  de ajuste de la función potencial de predicción del caudal medio difiere ligeramente del promedio de los coeficientes  $K_i$  de ajuste del caudal de cada emisor individual. El exponente  $x$  de ajuste para la función potencial de predicción del caudal medio es exactamente igual que el promedio de los exponentes  $x_i$  de ajuste del caudal de cada emisor individual.
- Para los emisores autocompensantes, los coeficientes  $A$ ,  $B$  y  $C$  de ajuste de la función parabólica del caudal medio coinciden exactamente con los promedios de los coeficientes  $A_i$ ,  $B_i$  y  $C_i$  de ajuste de la función de predicción del caudal de cada emisor individual.
- El coeficiente de variación de fabricación  $CV$  en las dos formas propuestas (ensayo y predicho) varía con la presión, tanto para emisores no autocompensantes como autocompensantes.

- e) Para los emisores no autocompensantes, las variaciones del  $CV_{\text{ensayo}}$  y del  $CV_{\text{predicho}}$  con la presión pueden predecirse mediante funciones de ajuste tipo potencial.
- f) Para los emisores autocompensantes, las variaciones del  $CV_{\text{ensayo}}$  y del  $CV_{\text{predicho}}$  con la presión pueden predecirse mediante funciones de ajuste tipo parabólico.
- g) Los valores de  $\overline{CV}_{\text{continuo}}$ ,  $\overline{CV}_{\text{discreto}}$  y  $CV_{9261}$  calculados a partir de los caudales realmente medidos en el ensayo difieren poco de los obtenidos a partir de los caudales predichos, por lo que los modelos de predicción tanto de los caudales como del CV es perfectamente válido.
- h) El  $CV_{9261}$  difiere en general de los  $\overline{CV}_{\text{continuo}}$  y  $\overline{CV}_{\text{discreto}}$  y no se considera un indicador apropiado para caracterizar un emisor, especialmente si es de tipo autocompensante.
- i) La influencia de la presencia de datos anómalos se minimiza si se utilizan los caudales predichos para cada emisor individual.

Por todas ellas se recomienda utilizar el modelo propuesto en este trabajo para determinar el coeficiente de variación de un emisor CV.

## 5. Bibliografía

- AENOR (2010). UNE-EN ISO 9261:2010: Equipos de riego. Emisores y tuberías emisoras. Especificaciones y métodos de ensayo. (2010).
- AENOR (2012). UNE 53367-1:2012: Plásticos. Sistemas de canalización en materiales plásticos para conducción de agua para microirrigación. Polietileno (PE). Parte 1: Especificaciones para tubos. (2012).
- Bralts, V. F., Wu, J. P., & Gitlin, H. M. (1981). Manufacturing variation and drip irrigation uniformity. *Transactions of the ASAE*, 24
- Demir, V., Yurdem, H., & Degirmencioglu, A. (2007). Development of prediction models for friction losses in drip irrigation laterals equipped with integrated in-line and on-line emitters using dimensional analysis. *Biosystems Engineering*, 96(4), 617-631.
- Karmeli, D., & Keller, J. (1975). *Trickle irrigation design*. Glendora, California (USA): Rain Bird Sprinkler Manufacturing Corporation.
- Keller, J., & Karmeli, D. (1974). Trickle irrigation design parameters. *Transactions of the ASAE*, 17
- Rodrigo, J., Hernández, J. M., Pérez, A., & González, J. F. (1997). *Riego localizado*. Madrid: Mundi-Prensa: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- Royuela, Á, & Turégano, J. V. (2012). Assessment of hydraulic behaviour of regulated emitters in laboratory. *Actas De La International Conference of Agricultural Engineering. CIGR-AgEng2012*. Valencia
- Solomon, K. H. (1979). Manufacturing variation of trickle emitters [irrigation equipment]. *Transactions of the ASAE*, 22
- Turégano, J. V. (2014). *Modelización del comportamiento hidráulico de una subunidad de riego localizado*. Riunet: Repositorio Institucional de la UPV.



## ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UNA RED DE ABASTECIMIENTO DE AGUA DE RIEGO A PRESIÓN ATENDIENDO A LA NATURALEZA DE LAS CONDUCCIONES.

*Delgado de Molina, J.<sup>1</sup>, Martínez, F.<sup>2</sup>, Bórnez, F.<sup>3</sup>, Bas, J.<sup>4</sup>*

<sup>1</sup> Ingeniero Agrónomo, Profesor T.U. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento ingeniería cartográfica, fotogrametría, y geodesia, [jdelgado@cgf.upv.es](mailto:jdelgado@cgf.upv.es)

<sup>2</sup> Ingeniero Agrónomo, Jefe de obras y proyectos, Indefa Ingenieros, S.L.; Andarella 2, Esc. 2, 4º, Pta. 14, 46950 Xirivella (Valencia), [fmartinez@indefa.com](mailto:fmartinez@indefa.com)

<sup>3</sup> Ingeniero Técnico Agrícola, Técnico, Indefa Ingenieros, S.L.; Andarella 2, Esc. 2, 4º, Pta. 14, 46950 Xirivella (Valencia), [fbornez@indefa.com](mailto:fbornez@indefa.com)

<sup>4</sup> Ingeniero Agrónomo, Técnico, Indefa Ingenieros, S.L.; Andarella 2, Esc. 2, 4º, Pta. 14, 46950 Xirivella (Valencia), [jbas@indefa.com](mailto:jbas@indefa.com)

### 1. Resumen.

En la mayor parte de instalaciones de riego comunitarias modernizadas, que utilizan conducciones a presión para facilitar el manejo y la distribución del agua, los costes energéticos constituyen uno de los principales costes para los regantes. Se pretende con este trabajo, cuantificar los costes de energía disipada por fricción para una red de riego, en función del material adoptado para sus conducciones, poniendo de manifiesto las diferencias entre ellos. Con objeto de considerar la eficiencia energética, como un factor más a tener en cuenta a la hora de seleccionar uno u otro material, para el diseño de nuevas instalaciones. Para analizar el comportamiento de cada material, se ha establecido una comparativa entre ellos, mediante la utilización del modelo matemático de una red existente en la realidad, a través de un software de simulación hidráulica. La red estudiada ha sido la red de transporte de la Real Acequia de Escalona; la cual discurre íntegramente en término municipal de Villanueva de Castellón (Valencia), con una longitud total de 11 km de conducciones de Poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV), con diámetros nominales comprendidos entre los 400 mm y los 800 mm y que se encuentra en funcionamiento desde el mes de junio de 2011. Los otros materiales estudiados han sido: Policloruro de vinilo orientado (PVC-O), Polietileno (PE), Acero (AC) y Fundición dúctil (FD). Tras el análisis realizado se ha podido determinar que el material que tiene un funcionamiento más eficiente (a igualdad de DN para cada tramo) es el PRFV, con unas pérdidas por fricción de 52,0 MW·h/año. Para el resto de materiales, esta cantidad puede verse incrementada entre un 17,5% y un 86%.

### Abstract.

In most of the modernised irrigation infrastructures, using pressurized pipelines in order to improve management and distribution of water, energy costs become one of the main costs for users. This work evaluates the cost of frictional pressure loss in an irrigation network, depending on the chosen material for pipes, in order to state differences among the materials. The objective of this work is to consider energy efficiency as a factor to keep in mind when selecting the material for pipes, in designing new networks. In order to analyze the performance of each material, we have established a comparative study among them, using the mathematical model of a real network with an hydraulic simulation software. The studied network is the Transport Network of "Real Acequia de Escalona", which is set up in Villanueva de Castellón (Valencia), with a total length of 11 km of glass-fiber reinforced plastic (GFRP), with nominal diameters between 400 and 800 mm. This network is

operational since June 2011. The other studied materials are Polyvinyl chloride (PVC), polyethylene, steel and cast iron. As a conclusion, the study shows us that the most efficient material (for the same diameter) is GFRP, with frictional losses of 52,0 MW·h/year. For the rest of the materials, this amount could be increased between 17,5% and 86%.

## **2. Introducción.**

La estructura del coste energético asociado a la explotación de una red de riego es compleja, interviniendo en ella multitud de factores. El presente trabajo se centra exclusivamente en los relativos a la energía disipada por fricción, entendida como el “peaje energético” que hay que pagar para poder suministrar el agua a los usuarios a través de la red. En la magnitud de este peaje, juega un papel decisivo el material y la naturaleza de las conducciones que integran la misma.

El parámetro estudiado para evaluar, en cada caso, la eficiencia energética de la red estudiada, es el coste medio anual de pérdidas de carga por hectárea irrigada.

## **3. Descripción del tema objeto de la comunicación.**

### **3.1. Eficiencia energética en la distribución.**

En lo relativo a la distribución del agua en una red de riego a presión, se pueden distinguir claramente cuatro etapas:

- Presurización del agua en cabecera de la red.
- Distribución a través de la red de tuberías.
- Suministro a parcela a través de los hidrantes multiusuario y acometidas particulares.
- Consumo final en el interior de parcela.

De las cuatro, las dos primeras resultan clave a la hora de evaluar el consumo energético, y especialmente el sobreconsumo susceptible de ser reducido mediante actuaciones de eficiencia. Por el objetivo final del presente estudio, nos vamos a centrar exclusivamente en la etapa de distribución del agua a través de las tuberías.

Una vez que el agua entra en la red de tuberías, comienza la etapa de distribución propiamente dicha, circulando a través de todas las conducciones, desde las grandes arterias principales hasta los últimos ramales de menor diámetro, para ser entregada a los regantes a través de las tomas a parcela.

A lo largo de este recorrido, son dos los aspectos a considerar desde una perspectiva energética:

- Las pérdidas de carga (energía) por fricción.
- Las fugas de agua.

Por buenas que sean las condiciones de renovación, mantenimiento y operación de una red, la existencia de fricción y de fugas siempre será inevitable.

La mejor herramienta para poder evaluar ambos tipos de pérdidas es la realización de una auditoría energética sobre la distribución de agua a través de la red.

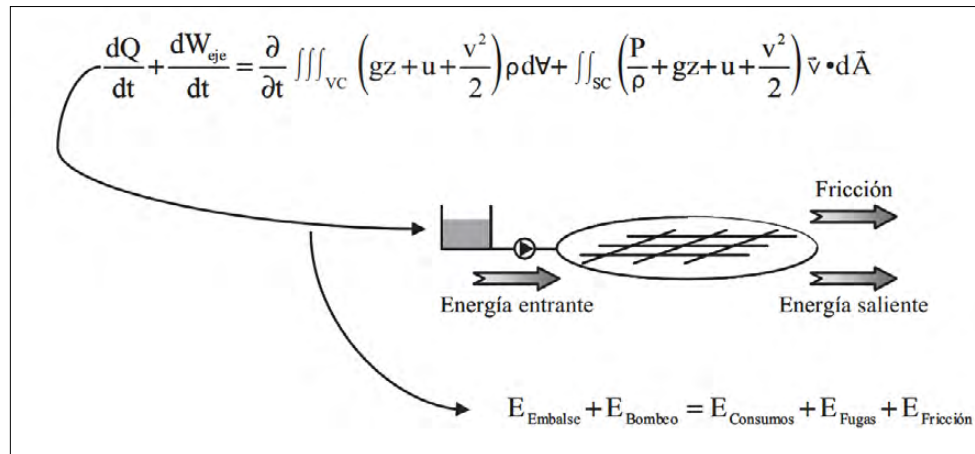
En tuberías nuevas y bien dimensionadas a los caudales a transportar, la tasa de pérdidas de carga por longitud (pendiente hidráulica) suele estar en torno a los 3 mca/km, o menos.

En lo referente a las fugas, hay que decir que través de una fuga no escapa sólo agua de la red, sino que junto con ésta, también lo hace la energía de presión que mantiene

acumulada desde su entrada en cabecera, y que de este modo se libera al exterior (se echa a perder) sin uso ni utilidad algunos.

Las fugas a su vez, también influyen directamente en las pérdidas de carga, pues en la medida en que aumenta el caudal transportado para compensar el que se pierde por las fugas, aumentan las pérdidas de carga.

Un planteamiento para el estudio conceptualmente muy sencillo, es el que formula Cabrera y col. (2010. Figura 1, tomada del mismo autor), y que consiste en entender la red de tuberías no como un transporte de agua, sino en el amplio sentido del término, como un transporte de energía.



**Figura 1.** Planteamiento conceptual de la auditoría energética de una red y sus ecuaciones principales. Cabrera y col. (2010).

De forma paralela al agua que entra en la red por uno o más puntos (cabecera) y sale por otros (consumos y/o fugas), tal y como muestra la Figura 1, la red también tiene unas entradas y unas salidas de energía. Como entradas se encuentran:

- El aporte de energía potencial gravitatoria desde los depósitos de almacenamiento en cabecera.
- El aporte de energía elástica de presión por parte de los bombeos de apoyo que tenga.

Por otra parte las salidas de energía son las siguientes:

- El consumo de agua por parte de los regantes. Es decir, la energía de presión con la que se entrega el volumen a parcela a través de la toma individual.
- La fugas de agua, según se ha detallado más arriba.

La energía disipada por fricción. Este término, también detallado más arriba, no es una salida energética de la red en términos estrictos, pero sí supone, como disipación, un incremento de la energía contenida en el sistema

### 3.2. Caso de estudio: Red de transporte de la Real Acequia de Escalona.

La Red de Transporte de la Real Acequia de Escalona tiene una longitud de total de 11 km de tubería instalada. En naturaleza de poliéster reforzado con fibra de vidrio, presión nominal 10, rigidez nominal 5000 y rango de diámetros comprendidos entre 400 y 800 mm.

Esta red de transporte abastece a 7 cabezales, lleva en funcionamiento desde junio de 2011 y en la actualidad la superficie total irrigada es de 825,92 hectáreas repartida en aproximadamente 1900 tomas.



**Figura 2.** Superficie regable y red de transporte de la Real acequia de Escalona.

### 3.3. Método de cálculo

Se realizará el análisis hidráulico de la red con el programa informático EPANET. Se trata de una aplicación informática de difusión general desarrollada por la Agencia de Protección Medioambiental de Estados Unidos (US Environmental Protection Agency – EPA). EPANET permite realizar simulaciones en periodo extendido del comportamiento hidráulico de redes de distribución a presión. Determina el caudal que circula por cada conducción y la presión en cada uno de los nudos en diferentes intervalos de tiempo. Entre sus múltiples funcionalidades calcula las pérdidas por fricción en las conducciones. Se ha utilizado la fórmula de Hazen-Williams para calcular las pérdidas por fricción. Los coeficientes adoptados para cada material han sido los siguientes:

**Tabla 1.** Valores del coeficiente C adoptado en el estudio según materiales

Material	C
Plásticos	150
Fundición	140
Acero	120

### 3.4. Datos y topología de la red

La red tiene su inicio aguas abajo de la estación de bombeo de captación directa del canal de la Real Acequia de Escalona. Desde este punto se transporta el agua a los 7 cabezales que distribuyen a toda la superficie de la comunidad de regantes. El riego de toda la superficie se realiza en 4 turnos de 2 horas de duración. Los parámetros básicos que configuran la simulación hidráulica son la presión en el inicio de la red y los caudales de demanda de cada cabezal. Estos datos están tomados del funcionamiento real de la red en la última campaña de riego. La presión en el inicio se ha tomado del transductor instalado aguas abajo de las bombas que nos indica la presión que proporciona la estación de bombeo para cada turno. Los caudales de demanda de los cabezales se han tomado de los datos de consumo registrados para cada cabezal. Obtenemos de esta manera 4 escenarios (4 turnos o intervalos de tiempo) para los cuales se realizará la simulación.

**Tabla 2.** Puntos de funcionamiento de la red.

Turno	Q (m <sup>3</sup> /h)	H (mca)
1	2.062	44,68
2	2.136	43,77
3	2.071	44,58
4	2.260	42,05

En cuanto la topología, se trata de una red ramificada, con un dimensionado de diámetros comprendidos entre 400 y 800 mm, con la siguiente distribución de longitudes

**Tabla 3.** Dimensionado de la red.

DN (mm)	800	700	600	500	400	Total
Longitud (m)	1.416	797	2.178	1.579	5.037	11.007

En la siguiente tabla se indican los datos de longitudes y diámetros de la red:

**Tabla 4.** Datos de la red.

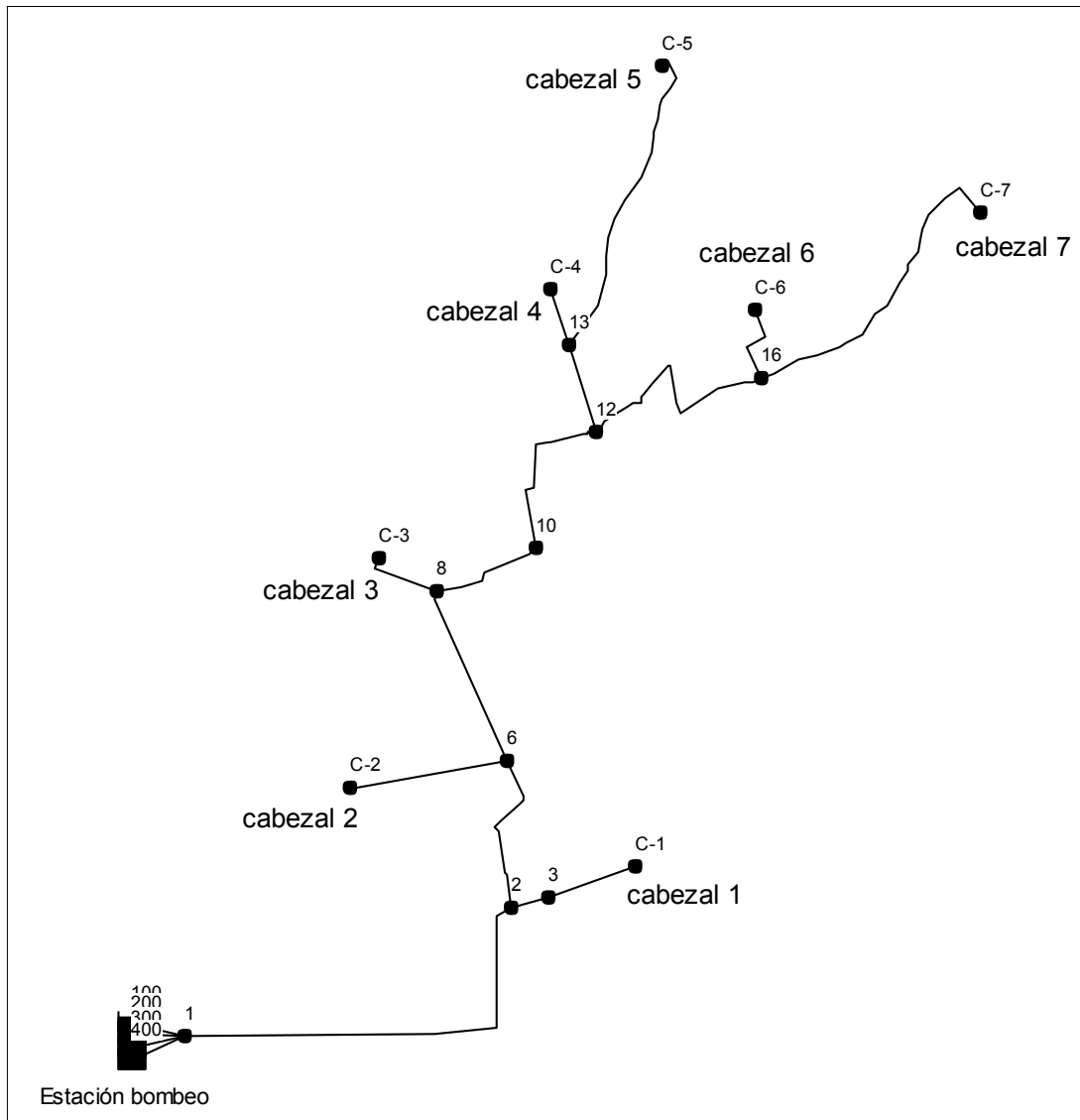
Línea	Nudo inicial	Nudo final	Cota nudo final	Longitud (m)	Diámetro nominal (mm)
1	0	1	44,18	1,00	800
2	1	2	37,69	1.416,10	800
3	2	3	38,27	116,00	400



Línea	Nudo inicial	Nudo final	Cota nudo final	Longitud (m)	Diámetro nominal (mm)
4	3	C-1	38,46	37,50	400
6	2	6	32,76	796,50	700
7	6	C-2	33,68	856,80	400
8	6	8	28,73	869,00	600
9	8	C-3	26,85	328,40	400
10	8	10	29,19	544,00	600
12	10	12	27,74	764,90	600
13	12	13	26,57	426,00	500
14	13	C-4	27,31	276,00	400
15	13	C-5	25,2	1.532,90	400
16	12	16	24,98	1.153,40	500
17	16	C-6	24,66	281,90	400
18	16	C-7	22,69	1.607,80	400

La siguiente figura muestra un croquis de la red:





**Figura 3.** Topología de la red.

### 3.5. Simulación hidráulica.

A partir de los datos anteriores se ha realizado la simulación hidráulica del comportamiento de la red de transporte de la RAE para cada uno de los materiales que se incluyen en el análisis comparativo para este rango de diámetros, Poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV), Policloruro de vinilo orientado (PVC-O), Polietileno (PE), Acero (AC) y Fundición dúctil (FD).

En el modelo de simulación hidráulica se han introducido las siguientes simplificaciones con la realidad.

- 1) Se ha considerado la situación ideal de ausencia total de fugas.
- 2) Se han eliminado del modelo las válvulas reductoras de presión que protegen los cabezales de riego de cada Unidad de Gestión Diaria (UGD), así como las de inicio de red (previstas para la conexión a las balsas de cota alta).

- 3) Se han eliminado del modelo los pozos de sequía, pues están previstos para funcionar exclusivamente en situaciones de emergencia, en caso de que los recursos superficiales no resultaran suficientes.

Como resultados obtenidos de la simulación con EPANET para cada uno de los materiales se obtienen las presiones de servicio en los cabezales y los parámetros hidráulicos de las líneas (caudal, velocidad y pérdida de carga unitaria).

### **3.6. Volumen de agua consumido.**

Se dispone del consumo de agua para el año hidrológico 2013 – 2014 (del 01/10/2013 al 30/09/2014) obtenido a partir de los datos de facturación facilitados por la Comunidad de regantes. El consumo total durante el año hidrológico ha sido de 2.983.778 m<sup>3</sup>.

### **3.7. Superficie regada.**

La superficie de riego de la Comunidad de regantes a fecha 30/09/2014 era de 9.911,38 hg (825,92 ha), según datos de la propia Comunidad.

### **3.8. Consumos de energía en la Estación de bombeo RAE.**

El consumo energético total en la Estación de bombeo durante el año hidrológico 2013 – 2014, obtenido a partir de las facturas de la compañía suministradora desde el 01/10/2013 hasta el 30/09/2014 fue de 618.875,50 kW·h. El importe total satisfecho a la compañía suministradora (impuestos incluidos), durante el mismo periodo fue de 76.776,17 €. El coste medio del kW·h en el periodo estudiado fue de 0,124058 €/kW·h.

### **3.9. Balances de energía**

El modelo de riego empleado consiste en abastecer la totalidad de la superficie en 4 turnos, con una duración de riego por turno de 2 horas. Los meses de máximas necesidades, se programa riego todos los días de la semana (7 riegos/semana). Los meses de menores necesidades se eliminan días de riego, pero no se modifica la duración de los mismos.

Por tanto el estudio realizado se particulariza para un riego y sus conclusiones serán extrapolables al total de riegos anuales.

En los balances de energía se ha despreciado en todos los casos el término cinético de la ecuación de Bernoulli o altura de velocidad, que para el rango de velocidades de la red adquiere valores inferiores a los 0,14 mca, lo que representa un 0,4% de la presión en los puntos de consumo.

Como hemos expuesto anteriormente, se considera la situación ideal de que no existen fugas, si tenemos en cuenta además que en la red objeto de estudio, no existe ningún punto elevado de acumulación (el agua se capta directamente de un canal en la que el agua entra por gravedad hasta la altura del eje de las bombas), la energía que entra en el sistema proviene íntegramente de la estación de bombeo, la cual se corresponde directamente con la entregada a los usuarios más las pérdidas por fricción.

$$E_{\text{Bombeo}} = E_{\text{Consumos}} + E_{\text{Fricción}}$$

Como resultado de los balances de energía para cada uno de los materiales, se obtiene la energía total anual perdida por fricción para cada uno de ellos.

### 3.10. Resumen final pérdidas de energía por fricción para cada material.

Los resultados obtenidos en los balances anteriores para el plazo temporal de un año completo se recogen de forma resumida en la siguiente tabla:

**Tabla 5.** Pérdidas de energía por fricción para cada material.

MATERIAL	$E_f$ (kW·h/año)	$E_f/E$ (%)	$\Delta E_f$ (% PRFV)
PRFV	51.956,82	14,61	-
PVC-O	61.025,05	17,16	17,45
Fundición	66.639,70	18,73	28,26
PE	88.473,44	24,87	70,28
Acero	96.652,08	27,17	86,02

$E_f$  = Es la energía perdida por fricción en kWh/año y es distinta para cada material estudiado.

$E_f/E$  = Es la relación entre la energía inyectada a la red y la energía perdida por fricción en la misma en % para cada material estudiado.

$\Delta E_f$  = Es el incremento de energía perdida por fricción en % de cada material estudiado, con respecto al más eficiente de todos (PRFV).

## 4. Conclusiones.

La energía inyectada en la red (E) es de 355,7 MW·h/año, aportada como hemos dicho anteriormente por el bombeo. Entre un 14,61% y un 27,17% (en función del material estudiado) se disipa por fricción.

Tal y como se puede ver en la tabla anterior, el material que tiene un funcionamiento más eficiente (a igualdad de DN para cada tramo) es el PRFV, con unas pérdidas por fricción de 52,0 MW·h/año, frente a las 61,0 MW·h/año del PVC, 66,6 MW·h/año de la fundición, 88,5 MW·h/año del PE y 96,7 MW·h/año del acero.

Comparativamente, se puede afirmar a partir de los datos obtenidos que el PVC presenta unas pérdidas por fricción un 17,45% superiores al PRFV, la fundición un 28,26%, el PE un 70,28%, elevándose hasta el 86,02% para el caso del acero.

Pero para poder inyectar esa cantidad de energía en la red E, la estación de bombeo consume una cantidad de energía de la red eléctrica mucho mayor. Esa energía total, a la que denominamos  $E_b$ , es la queda registrada en el contador de energía eléctrica de la compañía suministradora y que para el periodo estudiado (01/10/2013 a 30/09/2014) es de 618,9 MW·h/año. La relación entre ambas es lo que se denomina EEB (Eficiencia energética en los bombeos), y en nuestro caso es del 57,5 % correspondiéndose con una Eficiencia Normal (Abadía y col. 2008).

La diferencia entre ambas es la energía total que se pierde antes de ser inyectada a la red y se corresponde con las pérdidas por rendimiento hidráulico de la instalación entre el punto de medida de la presión y la salida de las bombas ( $\eta_p$ ), rendimiento en las bombas ( $\eta_b$ ), pérdidas por rendimiento en los motores ( $\eta_m$ ), pérdidas por rendimiento en el cableado

y aparellaje de maniobra entre el transformador y el motor ( $\eta_c$ ), pérdidas por rendimiento en variador de velocidad que acciona el motor ( $\eta_v$ ) y pérdidas por rendimiento en el transformador ( $\eta_t$ ).

$$EEB = \eta_p \cdot \eta_b \cdot \eta_m \cdot \eta_c \cdot \eta_v \cdot \eta_t = \eta_T$$

La relación entre la energía perdida por fricción ( $E_f$ ) y la energía empleada en el bombeo para vencer las pérdidas por fricción ( $E_{bf}$  medida en el contador de la compañía suministradora de energía) es la misma.

Por otra parte, si tenemos en cuenta que en función del uso que se hace de la energía en la estación de bombeo de la RAE (94,9% en periodo “valle”, 3,5% en periodo “llano” y 1,6% en periodo “punta”), el precio medio del kW·h (incluyendo término de potencia e impuestos) satisfecho a la compañía suministradora ha sido de 0,124058 €/ kW·h, se pueden establecer las siguientes relaciones:

**Tabla 6.** Energía empleada en el bombeo para vencer las pérdidas de energía por fricción para cada material.

MATERIAL	$E_{bf}$ (kW·h)/año	$E_{bf}$ (€)/año	$E_{bf}$ (kW·h)/m <sup>3</sup>	$E_{bf}/S$ (kW·h/ha)/año	$E_{bf}/S$ (€/ha)/año
PRFV	90.395,85	11.214,33	0,030	109,45	13,58
PVC-O	106.172,99	13.171,61	0,036	128,55	15,95
Fundición	115.941,51	14.383,47	0,039	140,38	17,42
PE	153.928,43	19.096,05	0,052	186,37	23,12
Acero	168.157,83	20.861,32	0,056	203,60	25,26

Lo que supone un coste anual de 11.214,33 € en pérdidas por fricción en el transporte para el caso del PRFV. En el caso del PVC-O esta cantidad se incrementa en 1.957,26 €, en el de la fundición en 3.169,14 €, en el del PE en 7.881,82 €, y en 9.647,00 € en el caso del acero.

Teniendo en cuenta que el volumen anual distribuido por la red de transporte es de 2.985.150 m<sup>3</sup> y que la superficie total irrigada es de 825,92 ha, podemos decir que los costes de energía por fricción soportados en la fase de transporte van desde los 13,58 €/ha para una red de PRVF, hasta los 25,26 €/ha de esta misma red confeccionada en acero. En el caso del PVC-O los costes son de 15,95 €/ha, de 17,42 €/ha para la fundición y de 23,12 €/ha para el PE. Para conocer exactamente el coste medio anual de pérdidas de carga por hectárea irrigada en cada caso, tendríamos que añadir a los costes anteriores, los costes de energía perdida por fricción en la fase de distribución, su obtención escapa del ámbito del presente estudio.

## 5. Recomendaciones.

Sería cuanto menos interesante, a tenor de los resultados obtenidos en el presente trabajo, el considerar la eficiencia energética, como un factor más a tener en cuenta, a parte de los tradicionalmente considerados (coste de adquisición y coste de instalación) a la hora de seleccionar uno u otro tipo de material, para el diseño de nuevas instalaciones.



## 6. Agradecimientos.

Llegados a este punto, hemos de agradecer de forma especial la colaboración desinteresada recibida de la Real Acequia de Escalona, en particular de su personal técnico y administrativo, así como de su Junta Directiva. También queremos agradecer el apoyo prestado por la división técnica de la empresa Amiantit Spain S.A., sin el cual este trabajo nunca hubiese visto la luz.

## 7. Bibliografía.

- Arviza, J. y Santamarina, C., (1995), *Ingeniería rural: Hidráulica*. Ed. Servicio de publicaciones. UPV. Valencia.
- Montalvo, T., (2003), *Ingeniería hidráulica*. Ed. Inter Técnica Ediciones. Valencia.
- Rocamora, M.<sup>a</sup> C.; Abadía, R.; Cámara, J.M.; Melián, M.<sup>a</sup> A.; Puerto, H.; Ruiz, A., (2010), *Manual de auditorías energéticas en comunidades de regantes*.
- Uche, J., (2013). *La energía en el agua*. Ed. Barcelona
- Varios autores, (2003) *Guía Técnica sobre tuberías para el transporte de agua a presión*. CEDEX: Sección de Edición.
- Varios autores, (2012). *Guía sobre Hidroeficiencia Energética*. Comunidad de Madrid.



## BOMBEO SOLAR DE ALTA POTENCIA CON PRESION Y CAUDAL CONSTANTE. CASO DE ÉXITO

*Omaña Álvarez J.M. (1), Antonio de Castro. (2), Medrano Villalón J. (3)*

- (1) Ing. Agrónomo. Dpto. de Trasferencia tecnológica. AIMCRA (Asociación de Investigación para la mejora del cultivo de la remolacha azucarera). Crta. Villabañez, 201, 47012 Valladolid. Correo: [j.m.omana@aimcra.es](mailto:j.m.omana@aimcra.es)
- (2) Ing. Industrial e Ing. de Telecomunicaciones. Director de Riego Solar. C/Felipe Sánchez Román, 19 2º C, 47008 Valladolid; Correo: [info@riegosolar.net](mailto:info@riegosolar.net)
- (3) Agricultor. Lic. en Filosofía y Letras, Cooperativa Estrella de S. Juan. Villavieja del Cerro, Valladolid. Correo: [justino.medra@gmail.com](mailto:justino.medra@gmail.com)

### Resumen

Fruto del impulso de AIMCRA y de la colaboración entre las empresas RiegoSolar y la cooperativa Estrella de S. Juan, se ha hecho realidad un proyecto de riego y energía de gran impacto innovador. La puesta en marcha de un demostrador de bombeo solar directo de alta potencia con presión y caudal constante, con el que se ha conseguido reducir el coste del riego en un 80% y las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera en un 100%.

El sistema patentado por la empresa española de ingeniería RiegoSolar, es capaz de mantener la presión constante en riegos por aspersión de cualquier tamaño, tanto coberturas como pivotes o cañones, sin recurrir al uso de energías convencionales, ni al almacenamiento de energía en baterías o de agua en grandes balsas.

En este demostrador, basado en el uso exclusivo de la energía solar, se consigue también mejorar la eficiencia energética e hidráulica de la instalación, automatizar por completo la gestión del riego y realizar la programación de los riegos en base a las necesidades reales de los cultivos.

La instalación se localiza Torrecilla de la Abadesa (Valladolid), y ya ha funcionado a pleno rendimiento durante una campaña completa. Otras cuatro instalaciones más, de características similares, han entrado en funcionamiento durante el primer semestre de 2015.

### Introducción.

#### La energía solar y el riego

Dentro de los usos posibles de la energía solar fotovoltaica, tal vez el riego sea uno de los que mejor se adaptan a este tipo de energía fluctuante. La energía generada en los paneles fotovoltaicos y las necesidades de agua de los cultivos, están regidas por la misma variable, la radiación solar; a mayor insolación mayores necesidades de agua del cultivo, pero también mayor capacidad para producir energía fotovoltaica. Cuanto más se necesita regar, más energía fotovoltaica está disponible para el bombeo.

En la Gráfico nº1 se muestra la potencia fotovoltaica obtenida por radiación solar con una inclinación óptima durante los meses del año en España. Los meses de mayor radiación



solar coinciden con los de mayores necesidades de agua para el cultivo, por lo que en bombeo directo podemos aprovechar casi un 70% de la radiación anual.

## POTENCIA DISPONIBLE Kwh/m<sup>2</sup>

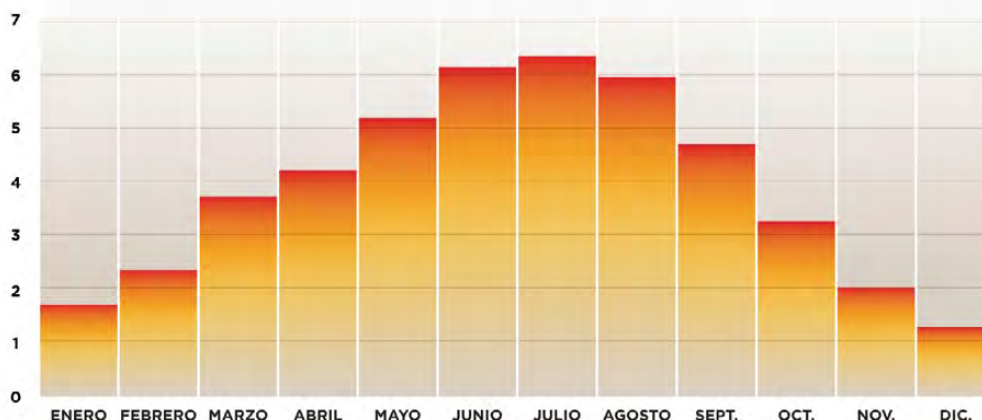


Grafico 1. Potencia disponible en kwh/m<sup>2</sup>

### Una oportunidad que debemos aprovechar

La agricultura es uno de los principales demandantes de energía de la sociedad, la extracción del agua desde captaciones subterráneas o superficiales, junto con la aplicación de la presión necesaria para el riego, supone un gran gasto de energía y un coste cada vez mayor.

La drástica bajada de precios de los paneles fotovoltaicos, junto con la tendencia al alza en el precio de los combustibles fósiles y la electricidad de red, han hecho que hayan ido apareciendo en el mercado sistemas de bombeo fotovoltaico que resultan rentables, aunque hasta ahora su aplicación se limitaba al abastecimiento para consumo humano o al riego por goteo o gravedad en pequeñas superficies.

En el caso del riego por aspersión aún quedaba un problema por resolver; conseguir mantener la presión y el caudal constante, es decir que no oscilasen con las variaciones de la radiación a lo largo del día.

Para poder mantener la presión constante hasta ahora no había más solución que almacenar el agua requerida por el cultivo para un día de riego, lo que se hacía principalmente de dos formas, mediante depósitos elevados donde la altura de la caída del agua aportaba la presión necesaria, o mediante balsas y una segunda bomba alimentada por fuentes de energía convencionales.

Esto presentaba el inconveniente de disponer de una elevada capacidad de almacenamiento de grandes cantidades de agua, lo que limitaba su aplicación a pequeñas superficies de cultivo, sin olvidarnos del consumo de energía, proporcionada por la red eléctrica o el gasóleo, de la segunda bomba encargada de aportar presión al agua embalsada.

## Descripción del proyecto

### Carácter innovador del proyecto de RiegoSolar

RiegoSolar es el primer bombeo solar directo que proporciona presión y caudal constantes y que es compatible con cualquier tamaño de finca, profundidad de pozo o sistema de riego, ya que solo requiere adaptar la potencia de sus componentes a las necesidades.

El sistema está especialmente indicado para regar por aspersión grandes extensiones, ya sea mediante pivotes, coberturas o cañones, en los que se necesita mantener la presión constante a pesar de las variaciones de radiación solar que se producen a lo largo del día o de la época del año. Este punto es importante para poder llegar al grueso de la agricultura de muchas regiones en las que se riegan por aspersión cultivos extensivos, como la remolacha azucarera.

Otra de las aportaciones del sistema podríamos denominarla “riego inteligente”. Mediante el cálculo de la ETC y la monitorización de los riegos y lluvias, se realiza el balance hídrico y la programación de los riegos, y mediante el empleo de automatismos se ejecutan los riegos con gran precisión y comodidad para el agricultor. La parcela se riega sola, con la frecuencia y la cantidad de agua que cada cultivo necesita en cada momento.

Finalmente se ha innovado en la eficiencia energética de la instalación, mediante el empleo de nuevos emisores en los pivotes se consigue desde la presión en las boquillas desde 3 bar hasta 0,6 bar, con una gran uniformidad en la distribución del agua en la parcela. Además se disminuyen las pérdidas por evaporación gracias al tipo de gota producida.

La energía solar fotovoltaica para riego se genera en instalaciones para autoconsumo puro, sin conexión a la red de las compañías eléctricas, no estando sujeta a ningún impuesto o gravamen. También puede resultar interesante utilizar un sistema híbrido de fotovoltaica y diésel, o conexión a la red eléctrica en los períodos de tarifa valle.

### Descripción del funcionamiento de la instalación

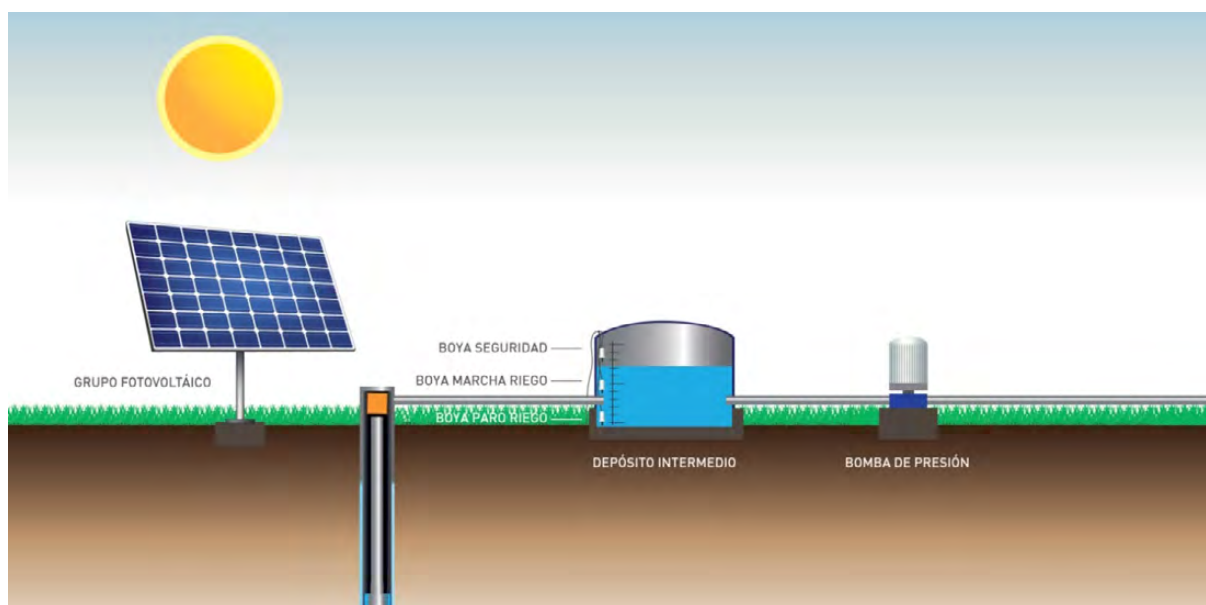


Figura 1: Esquema de la instalación

Se ha realizado una instalación fotovoltaica, en la que se han empleado 800 m<sup>2</sup> de paneles solares, que proporcionan una potencia de 120 kW-p, capaces de abastecer el bombeo de una explotación representativa de Castilla y León, con una superficie total en riego de 70 ha, correspondientes a cultivos como remolacha azucarera, guisante y alubia verde, patata, maíz, colza y cereales. En total se riegan unas 51 ha de cultivos de primavera y 19 de cultivos de verano, en algunos períodos coinciden en riego las 70 ha.

La energía solar es captada por los paneles solares, que están colocados en la cubierta de una nave, aunque también podrían estar colocados sobre el suelo. Los paneles fotovoltaicos producen corriente continua, que es necesario transformar en corriente alterna, esto se consigue sin utilizar inversores, mediante los propios variadores de frecuencia que alimentan las dos bombas del sistema, sin utilización de baterías, a través de un cuadro de control. Desde este cuadro de control que cuenta con seguimiento del punto de máxima potencia, un autómatas o PLC programado será el encargado de, contando con la información que facilitan las boyas de nivel del pozo y del depósito y en función de la radiación disponible en cada momento poner en funcionamiento las bombas por separado o a la vez.

Según se muestra en la figura 2, el agua se bombea mediante dos bombas, una bomba sumergida que funciona a régimen variable y extrae el agua desde un sondeo hasta un pequeño depósito de regulación, y otra bomba exterior que funciona a régimen fijo e impulsa el agua con caudal y presión constante y adecuado a cada sector de riego.



Figura 2: Cuadros de control y variadores de frecuencia

La energía se genera en una instalación fotovoltaica de autoconsumo aislada de la red eléctrica. No se utilizan baterías. Desde el cuadro de control (figura 2), que cuenta con seguimiento del punto de máxima potencia, un autómatas o PLC programado es el encargado de optimizar el uso de la energía gestionando el régimen de funcionamiento de cada bomba en cada momento. Los mismos paneles alimentan los motores responsables del movimiento de los pivotes de riego y del resto de aparatos eléctricos, por lo que el sistema es totalmente autónomo.

El equipo se completa con automatismos y telecontrol que permiten la programación del riego mediante sectores de forma automática y remota desde cualquier dispositivo móvil con internet, utilizando una aplicación (App) propia.

#### Características de la instalación realizada en Tordesillas

Superficie regada: 19 ha de cultivos de verano y 51 ha de cultivos de primavera

- Nivel dinámico del agua en el sondeo: 90 m
- Instalaciones de riego: 3 pivotes (56 ha) y 3 coberturas a 12x18 (14 ha)
- Potencia fotovoltaica instalada: 121.600 Wp
- Emisiones de CO<sub>2</sub>: 0 –cero- frente a 120 t/año de CO<sub>2</sub> que se producían cuando se utilizaba gasóleo.
- Capacidad de bombeo: 150.000 l/hora
- Horas de funcionamiento continuo: 10 a 12 horas/día durante la temporada de riego
- Presión del agua en los emisores: en cobertura se riega a 4,5 bar y en pivotes a 1,5 bar a la salida de la bomba.

#### Rentabilidad

Sin duda el gran interés que este sistema despierta entre los agricultores españoles es la posibilidad de reducir a menos de la cuarta parte del coste del riego, tanto en el bombeo como la impulsión.

En el grafico 2 se muestra la evolución histórica de precios de gasóleo agrícola desde 1996 hasta la actualidad, vemos como el precio se duplica aproximadamente cada 10 años, por lo que suponemos un incremento anual de un 7%.

**PREVISIÓN DEL PRECIO DEL GASÓLEO AGRÍCOLA EN 2021 (€/L)  
SEGÚN LA TENDENCIA DESDE 1996**

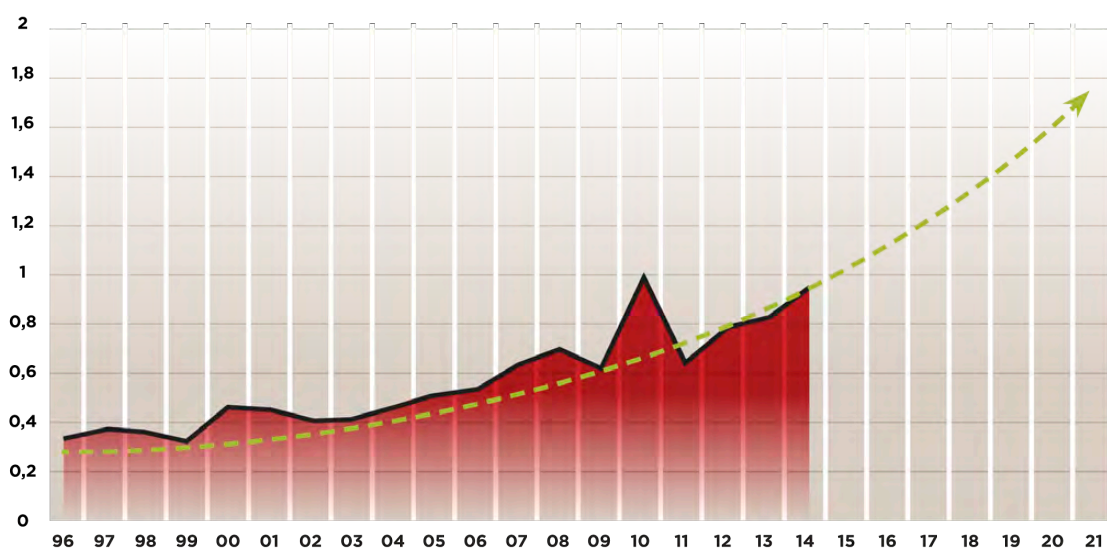


Grafico 2: Histórico y proyección sobre el precio del gasóleo agrícola

Para calcular la rentabilidad, se ha realizado el estudio de costes basado en el demostrador que se ha ejecutado en Tordesillas, comparando los costes del agua antes y después de ejecutar el proyecto.



En un año normal, el volumen de agua de riego necesario para atender los cultivos de esta explotación es de 240.730 m<sup>3</sup> anuales, de estos 111.400 m<sup>3</sup> corresponden a 19 ha de riego intensivo (remolacha y guisante-alubia) y 129.300 m<sup>3</sup> a 451 ha de riego de cultivos de primavera (trigo, colza y cebada). En la figura 3 se muestra el depósito y las placas solares sobre la nave.



Figura 3: Depósito y nave con las placas solares en la cubierta.

Bombeando con generador diésel el coste de energía en la explotación de Tordesillas ascendió en el año 2013 a 40.664 € anuales, lo que equivale a un coste energético de 17 céntimos de euro por m<sup>3</sup> de agua de riego, al que habría que sumarle la amortización del generador y de la bomba, estimado en 1,5 a 2 céntimos de €/m<sup>3</sup>).

Mediante bombeo solar se ha pasado a un coste del agua de 6 céntimos de €/m<sup>3</sup> (si se realiza la amortización de la inversión en un plazo de 12 años. El importe de la inversión asciende a 152.000 euros. En realidad la vida útil de la instalación es muy superior, los fabricantes de paneles solares garantizan un rendimiento de al menos el 80% al cabo de 20 años; en España es todavía posible ver las primeras instalaciones fotovoltaicas domésticas, que siguen funcionando después de más de 30 años.

Queda claro que la diferencia de coste entre utilizar la energía convencional o energía solar para el riego es muy grande, pues el plazo de recuperación de la inversión se calcula entre 4 y 5 años, siendo similar la rentabilidad para todo tipo de captaciones de agua, ya se trate de perforaciones o sondeos profundos como de aguas superficiales de pozos, ríos o canales, en las que los requerimientos de potencia son menores, pues en esos casos aunque el ahorro es menor, también es mucho menor la potencia requerida y por tanto la inversión a realizar.

### Valoración económica de la instalación de Tordesillas

- Coste de la instalación: 152.000 €
- Coste del agua bombeada: 0,06 €/m<sup>3</sup> frente a los 0,17 €/m<sup>3</sup> cuando se utilizaba el generador de gasóleo. Nota: no existe factura de energía, los 6 céntimos corresponden a la amortización de la instalación en un periodo de 12 años, aunque la vida útil es mucho mayor.
- Plazo de recuperación de la inversión: 4,5 años

### **Conclusiones**

Con el coste actual de las energías convencionales no renovables y con las subidas que se prevén para el futuro, el riego solar es sin duda una buena solución para conseguir mejorar la rentabilidad de los cultivos de regadío en España y otros países. Pero además del aspecto económico, existen indicadores que nos hacen pensar que el bombeo solar ocupará un papel principal en el riego del futuro, pues permite eliminar por completo las emisiones de CO<sup>2</sup> a la atmósfera y proporciona autonomía energética al agricultor. Resultará especialmente útil en aquellos países del tercer mundo o en vías de desarrollo en los que se carece de infraestructuras para el transporte energético.

Dadas las grandes ventajas del bombeo solar, se prevé que durante los próximos años se producirá una rápida difusión de este tipo de tecnología entre los agricultores, de hecho en el primer semestre 2015 se han construido seis nuevas instalaciones con potencias superiores a los 100 kW en la provincia de Valladolid.



Figura 4: Pivote con emisores I-Wobs de baja presión (6 psi).





XXXIII Congreso Nacional de Riegos  
Universitat Politècnica de València, Valencia 2015  
DOI:<http://dx.doi.org/10.4995/CNRiegos.2015.1515>

## **Agradecimientos**

A todas las empresas que han colaborado o apoyado este proyecto: Azucarera, RKD, Senninger, Krannich, solar, Omron, Grundfos, Silver Hidráulica, Regaber, Raesa, Vyrsa e ITC.



## DESARROLLO Y CALIBRACIÓN DEL BANCO DE ENSAYO PARA EMISORES DE RIEGO LOCALIZADO DEL LABORATORIO DE INGENIERIA RURAL, HIDRÁULICA Y RIEGOS (LHIR) DE LA UPV

*Balbastre Peralta, I.(1), Sanchis Alos, L.(2), Royuela Tomás, A. (3) , Arviza Valverde, J.(4), Turegano Pastor , J. Vte.(5)*

<sup>1</sup> Responsable Laboratorio LHIR, CVER, Dpto. DIRA Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, [ibbalpe@agf.upv.es](mailto:ibbalpe@agf.upv.es)

<sup>2</sup> Técnico Superior de Laboratorio LHIR, Dpto. DIRA Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, [luisanal@upvnet.upv.es](mailto:luisanal@upvnet.upv.es)

<sup>3</sup> PDI, CVER , Dpto. DIRA Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, [aroyuela@agf.upv.es](mailto:aroyuela@agf.upv.es)

<sup>4</sup> PDI, UD Hidráulica, Dpto. DIRA Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, [jarviza@agf.upv.es](mailto:jarviza@agf.upv.es)

<sup>5</sup> PDI, Dpto. DIRA Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, [jturegan@agf.upv.es](mailto:jturegan@agf.upv.es).

### Resumen

La caracterización de los emisores de riego localizado de acuerdo a la norma UNE EN ISO 9261, tiene unos niveles de exigencia difíciles de obtener en el caso de utilización de bancos de ensayo de emisores manuales. En el LHIR de la UPV, en base en las experiencias previas en el diseño de bancos tanto manuales como automatizados, se ha diseñado y construido un banco de emisores automatizado para poder efectuar los ensayos tal y como lo prescribe la norma. El banco ha sido diseñado para obtener un equipo compacto que ocupa poco espacio, en donde está completamente automatizado el funcionamiento todos los elementos del banco, desde los actuadores, hasta la lectura de sensores, permitiendo el registro continuo de los parámetros de ensayo y garantizando que estos se mantienen dentro de los valores marcados por la norma. El que sea un banco automatizado y controlado vía remota, elimina las limitaciones en la duración del tiempo del ensayo, aspecto muy interesantes en los goteros autocompensantes de bajo caudal y especialmente en los emisores antidrenantes para los que la norma vigente exige un control de la presión en las etapas antidrenantes muy difícil de conseguir de forma manual, pero que si es factible en este banco.

Después de una minuciosa puesta a punto y calibración del banco se ha constatado precisiones en la medición y regulación de la presión de 0,1 kPa, manteniendo estables las rampas de subida y bajada de presión, con errores de caudal por debajo de 0,5%.

Una novedad que introduce este banco frente a otros bancos automatizados es el diseño de un desviador de flujo que permite la estabilización en la pesada y precisión en la determinación de los caudales arrojados por los emisores.

El control en la ejecución y puesta a punto del banco permite mucha versatilidad en los ensayos a realizar, así como flexibilidad y control en modificaciones futuras del mismo.

## 1 Introducción y Objetivos

En el laboratorio de Hidráulica y Riegos de la Universitat Politècnica de València, en 1988, se diseñó y construyó un banco para el ensayo de emisores de riego localizado según la norma UNE 68075/68076. Los principales problemas detectados, después de más de 25 años de funcionamiento del banco, residían en el proceso manual de: la medición del caudal por gravimetría, el registro de los parámetros de control y la regulación de las presiones de ensayo. Estas limitaciones dificultan realizar los ensayos según la norma actual, ya que el ensayo de emisores compensantes y antridrenantes puede prolongarse más de 24 h según el nivel de precisión en la pesada, caudal del emisor y rango de presiones de funcionamiento, controlando en el ensayo la presión y temperatura de forma continua.

A modo de ejemplo, un emisor antidrenante con un rango de funcionamiento de 50 a 400 kPa, para efectuar el ensayo según norma UNE EN ISO 9261, se debe ensayar para unas 54 presiones o etapas distintas, lo que da un tiempo mínimo de ensayo de 6 h hasta un máximo, que dependerá de las características del banco, pero que para asegurar una precisión de 0,5 % del caudal, será de casi 24 h<sup>1</sup>.

En 2009 se desarrolló, construyó y puso a punto un banco automático para el ensayo de emisores de riego localizado para el ISID (Institut National des Sols de l'Irrigation et du Drainage) en Argel con requerimientos similares al existente en el Centro Nacional de Tecnología de los Regadíos (CENTER), ubicado en San Fernando de Henares (Madrid). A partir de esta experiencia se ha realizado el diseño y ejecutado un nuevo banco automatizado que permite abordar con garantías los ensayos según las exigencias de la norma actual.

Los objetivos que se plantearon en su diseño y construcción fueron los siguientes:

- Adecuar el banco de emisores para poder realizar los ensayos según determina la norma UNE EN ISO 9261.
- Automatizar el funcionamiento todos los elementos del banco, desde actuadores, hasta lectura de sensores, manteniendo o aumentando la precisión en las medidas realizadas.
- Permitir el registro continuo de los parámetros de ensayo, garantizando que estos se mantienen dentro de los valores marcados por la norma.
- Ser autosuficientes en el manejo, ampliación del banco y automatización de los ensayos.
- Solucionar problemas de funcionamiento del antiguo banco manual de ensayo, y del banco automático desarrollado para el ISID.
- Disponer de un banco que permita una gran variabilidad de ensayos a realizar.

El objetivo de la presente comunicación es mostrar el banco automatizado de ensayo de emisores de riego localizado construido y dar a conocer su versatilidad.

## 2 Materiales y Métodos

En el banco de ensayos automatizado realizado, que puede apreciarse en la figura 1, se distinguen las siguientes instalaciones y equipos.

---

<sup>1</sup> Se consideran en estos tiempos, los necesarios para el acondicionamiento del emisor y los necesarios para conseguir las presiones consigna entre etapas de ensayo.

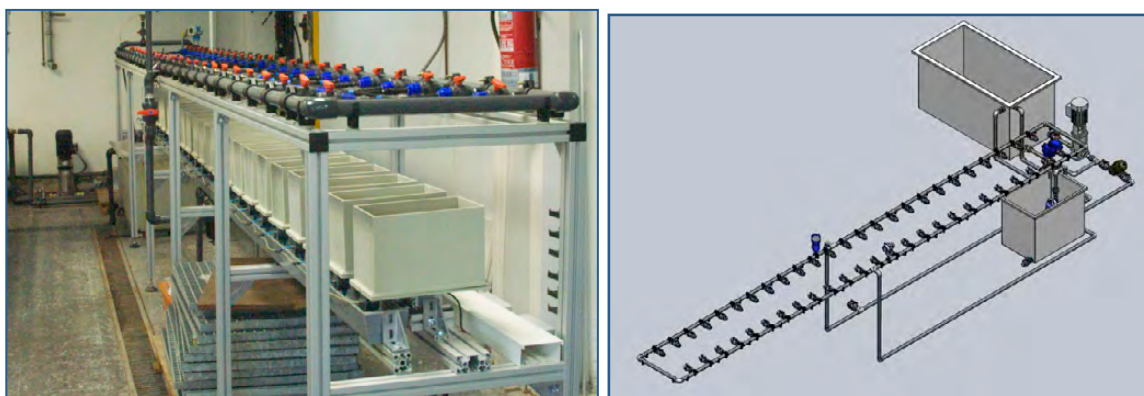


Figura 1: Esquema general del banco de ensayos.

## 2.1 Instalación Hidráulica

Consta de los siguientes elementos:

- Dos depósitos de polietileno. El principal de 600 l de capacidad está equipado con el sistema de regulación de temperatura (que se comenta más tarde) para que ésta permanezca constante durante todo el ensayo del emisor. El segundo de 250 l recoge el agua arrojada por los emisores, antes de retornarla al depósito principal.
- Estructura de perfiles de aluminio laminado sobre el que se dispone un tubería de PVC DN 40 PN 10, mallada y alimentada por su punto medio con objeto de minimizar las pérdidas de carga y garantizar que la presión es prácticamente la misma en todos los emisores ensayados.
- Accesorios para la instalación de los emisores formados por dos válvulas de bola DN 20 por cada emisor, más conexiones rápidas DN 20 y DN 16.
- Equipo de presión (fotografía 1) compuesto por una bomba centrífuga vertical Ebara EVM Acero Inoxidable AISI 304, modelo EVM3 9N5/1,1, con las siguientes características:
  - Potencia: 1,1 kW
  - Número de rodets: 9
  - Rango de presiones: 75 – 29,7 m
  - Rango de caudales: 1,2 – 4,5 m<sup>3</sup>/h
- Sistema de filtrado compuesto por dos filtros de anillas DN 1" y grado de filtración de 100 µm.
- Sistema de recirculación de agua con bomba de achiche Ebara NÁCAR 400 MS.
  - Potencia: 0,44 kW
  - Material carcasa motor: Acero inoxidable 304
  - Número de rodets: 1
  - Rango de presiones: 8,4 – 1,2 m
  - Rango de caudales: 0 – 7,8 m<sup>3</sup>/h
  - Regulador de nivel magnético incorporado.



**Fotografía 1: Grupo de presión, bypass con válvula motorizada y sensor de temperatura.**

## **2.2 Instalación de acondicionamiento de agua**

La regulación de temperatura en el banco se consigue con una precisión de  $\pm 1^\circ\text{C}$ . El calentamiento del agua se realiza mediante una resistencia eléctrica de 800 W .

Está previsto implementar en el futuro la refrigeración mediante un equipo refrigerador MUNE 05 HG de 5,5 kW, CL 25 601.

## **2.3 Sistema de control y adquisición de datos**

Formado por un variador electrónico de frecuencia, ALTIVAR 61 de Schneider Electric, para el control de la bomba y regulación automática de la presión de ensayo. La adquisición de los datos se realiza mediante autómatas del tipo Real Time Compact Rio de National Instruments (NI). Modelo CRIO 9073

## **2.4 Sistema de recogida y pesada del caudal**

Por cada emisor existen los siguientes elementos que pueden apreciarse en la fotografía 2 :

- Tolva de Polipropileno 300 x 150 x 200 mm. Capacidad de hasta 8 l.
- Desviador basculante y deflectores para el control del llenado y estabilización de la pesada, de accionamiento neumático.
- Célula de carga con certificación de fábrica M120 de 0 a 15 Kg precisión 2g, R60 Clase C. Utilcell.
- Válvulas de vaciado neumáticas mecanizadas y desarrolladas por los autores.





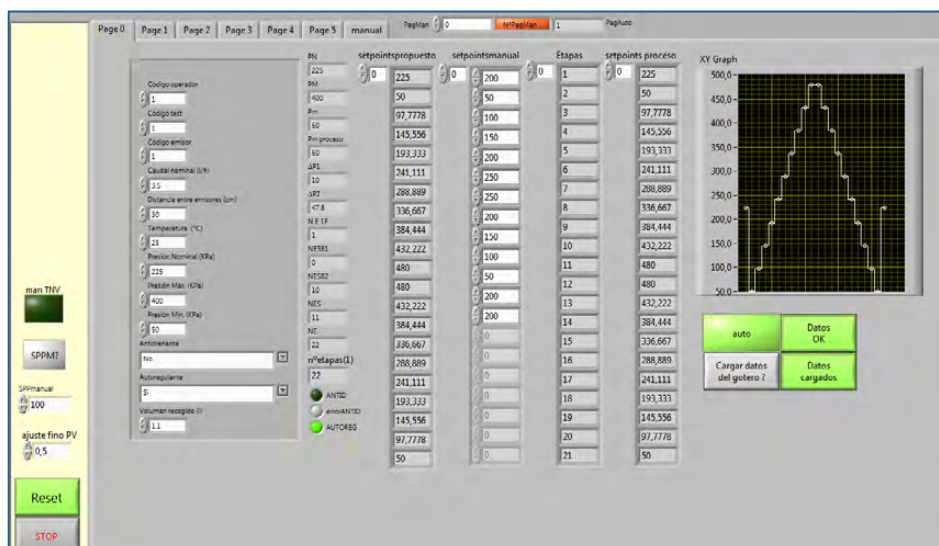
**Fotografía 2: Tolvas, desviador llenado, células de carga y válvulas neumáticas de vaciado.**

## 2.5 Sensores para la determinación de la presión y temperatura del ensayo

- Transductor de presión CERABAR PMP71-ABA1PB1GAAAA de E+H. Precisión  $\pm 0,05\%$ , ajustado para 0 - 7 bar.
- Sensor de temperatura Thermophant T TTR31 de E+H.

La aplicación de control y adquisición de datos ha sido desarrollada con LabView 2013 (NI) y permite el control total de todos los elementos del banco, incluso a distancia a través de red. En las figuras de la 2 a la 4 se puede apreciar cómo se define el número de etapas y presiones consigna del ensayo, el control de los parámetros del ensayo (temperatura y presión), así como el estado de la pesada en cada una de las tolvas y verificación de la presión consigna con límites de alarma

La aplicación dispone de controles totalmente configurables que se fijaran según los objetivos del ensayo, que pueden ser el cumplimiento riguroso de la norma o cualquier otro definido *ad hoc*.





**Figura 2: Pantalla inicial de introducción de los datos del emisor y calculo del número de etapas y presiones consigna de ensayo.**



**Figura 3: Pantalla de seguimiento del ensayo, control de bomba, temperatura y presiones.**



**Figura 4: Pantalla de control de la etapa de ensayo. Estado de la pesada y verificación de la presión consigna con límites de alarma.**

### 3 Resultados y Discusión

Después de una minuciosa puesta a punto y calibración del banco se ha constatado precisiones en la medición y regulación de la presión de 0,1 kPa, manteniendo estables las rampas de subida y bajada de presión, con errores de caudal por debajo de 0,5%.

El autómata recibe las señales del transductor de presión y en función de la misma regula la velocidad del motor para mantener la presión en el valor deseado. La válvula del bypass permite el retorno de parte del agua al depósito de aspiración. El posicionamiento de la válvula junto con la presión consigna permite al variador enviar al motor la frecuencia adecuada para conseguir de forma progresiva la presión consigna deseada en la etapa de cada ensayo.

Para el control de la temperatura el sensor de temperatura envía una señal al automático y este conecta o desconecta la resistencia para mantener la misma en su valor de consigna.

La obtención del caudal de cada emisor se obtiene por gravimetría. Antes de cada ensayo se calibran las 25 células de carga, con pesos de hasta 6 kg, obteniendo las rectas de calibrado correspondiente. Se introduce una tara para realizar las medidas en el rango de mayor precisión de las células de carga.

Un aspecto muy importante para de la determinación precisa del peso recogido en las tolvas, es cortar el flujo del agua y dejar que la célula de carga se estabilice. Para ello el banco dispone de un desviador neumático con canales para cada emisor, de forma, que una vez se ha alcanzado el peso objetivo en la tolva, se desvía el flujo al canal de desagüe, permitiendo la estabilización en la pesada. Este dispositivo puede apreciarse en la parte derecha de la fotografía 2. El desviador además permite realizar medidas manuales de los caudales arrojados por los goteros.

El banco automático se ha calibrado, comparando sus resultados con los obtenidos en el banco manual siguiendo el método propuesto por Turegano (2014). Se ha constatado que el banco tiene el potencial deseado, así como la versatilidad necesaria para el ensayo de emisores de riego localizado de cualquier tipo y múltiples condiciones de funcionamiento.

Mediante una macro de Excel, a partir de los datos registrados en el ensayo se obtiene de forma automática el informe de resultados. A continuación se muestran los informes para un emisor no autocompensante y para emisor autocompensante ambos integrado .

### 3.1 Resultados emisor 1 no autocompensante integrado.

**Tabla 1: Datos y resultados de Emisor 1**

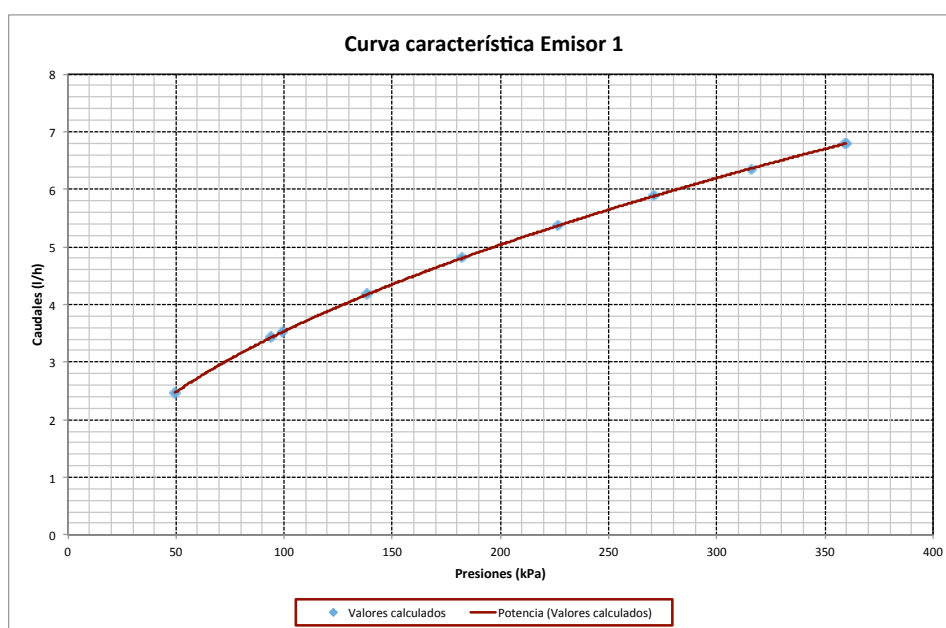
Laboratorio Riego Localizado UPV	Resultados
<b>Datos del emisor</b>	
Código del ensayo	1
Código del emisor	1
Código del operador	1
Denominación del emisor	Emisor 1
Fecha del ensayo	26/2/15
Tipo del emisor	No compensante
Sistema antidrenante	No
Caudal nominal (l/h)	3,5
Presión nominal (Kpa)	100
Presión mínima (Kpa)	50
Presión máxima (Kpa)	300
<b>Resultados ensayo</b>	
Fecha de procesado de datos	25/3/15
Número de emisores ensayados	25
Caudal medio (l/h)	3,53
Variación relativa de caudal (%)	-0,85
Coefficiente de variación CV(%)	2,55
Coefficiente de descarga k	0,34
Exponente de descarga x	0,51
Temperatura media ensayo °C	22,08
Hora inicio ensayo	9:35:23
Hora fin ensayo	15:42:15
Alarmas	Ninguna

**Tabla 2: Errores medida presión Emisor 1**

Presión máxima sensor:	700 kPa
Error lineal máximo:	±0,05 %
Error absoluto	±0,35 kPa
Error relativo de la medida de presión mínima realizada (49,687 kPa)	±0,704 %

**Tabla 3: Errores medida caudal Emisor 1**

Error absoluto tiempo	±82 ms
Error relativo de la medida de tiempo (15 min)	±0,0091 %
Error absoluto pesada	±2 g
Error relativo de la medida de peso mínimo (850 g)	±0,235 %
Error relativo caudal (caudal nominal 3,5 l/h)	±0,24 %



**Gráfica 1: Curva característica Emisor 1**

### 3.2 Resultados emisor 2 autocompensante integrado

**Tabla 4: Datos y resultados de Emisor 2**

Laboratorio Riego Localizado UPV	Resultados
<b>Datos del emisor</b>	
Código del ensayo	1
Código del emisor	1
Código del operador	1
Denominación del emisor	Emisor 2
Fecha del ensayo	17/3/14
Tipo del emisor	compensante
Sistema antidrenante	Si
Caudal nominal (l/h)	2,3
Presión nominal (Kpa)	-----
Presión mínima (Kpa)	50
Presión máxima (Kpa)	350

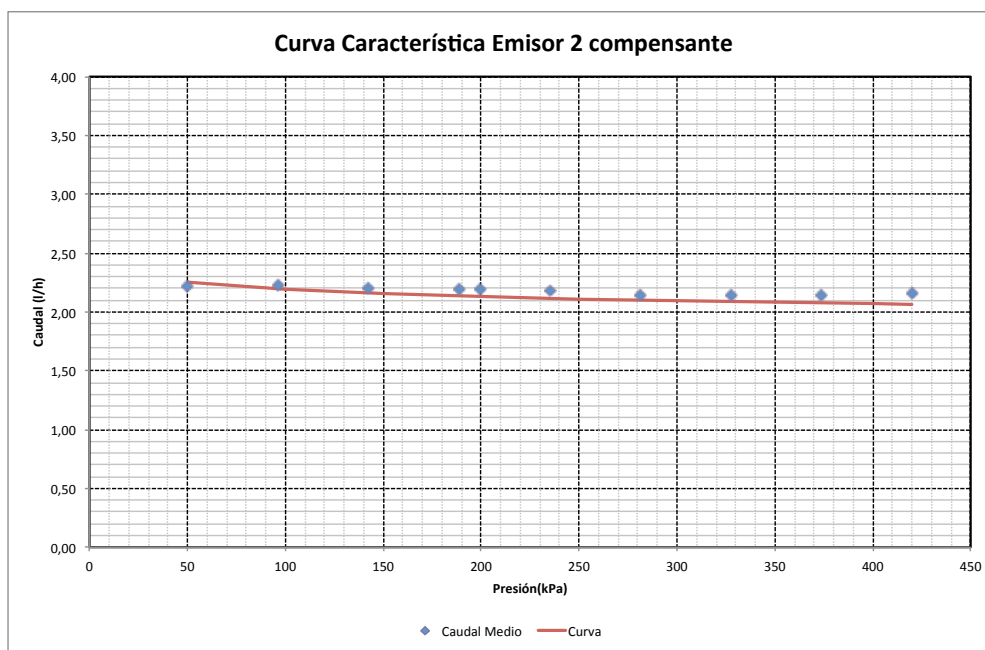
Resultados ensayo	
Fecha de procesado de datos	20/3/14
Número de emisores ensayados	25
Caudal medio (l/h)	2,19
Variación relativa de caudal (%)	-0,85
Coefficiente de variación CV(%)	2,64
Coefficiente de descarga k	0,34
Exponente de descarga x	-0,041
Temperatura media ensayo °C	22,46
Hora inicio ensayo	8:55:03
Hora fin ensayo	15:32:18
Alarmas	Ninguna

Tabla 5: Errores medida presión Emisor 2.

Presión máxima sensor:	700 kPa
Error lineal máximo:	±0,05 %
Error absoluto	±0,35 kPa
Error relativo de la medida de presión mínima realizada (50,002 kPa)	±0,700 %

Tabla 6: Errores medida caudal Emisor 2.

Error absoluto tiempo	±82 ms
Error relativo de la medida de tiempo (11 min)	±0,012 %
Error absoluto pesada	±2 g
Error relativo de la medida de peso mínimo (415 g)	±0,41 %
Error relativo caudal (caudal nominal 2,3 l/h)	±0,41 %



Gráfica 2: Curva característica Emisor 2.



## 4 Conclusiones y Recomendaciones

El banco de ensayo para emisores de riego localizado automatizado diseñado y construido por los autores y ubicado en el laboratorio de Ing. Rural, Hidráulica y Riegos (LHIR) de la Universitat Politècnica de València es muy preciso y permite ensayar con facilidad los goteros de acuerdo con la norma UNE EN ISO 9261. El diseño efectuado ha permitido realizar una construcción compacta ocupando muy poco espacio.

El que sea un banco automatizado y controlado vía remota, elimina las limitaciones en la duración del tiempo del ensayo, aspecto muy interesantes en los goteros de bajo caudal y emisores antidrenantes. El banco permite el ensayo de emisores antidrenantes. La norma vigente exige un control de la presión en las etapas antidrenantes muy difícil de conseguir de forma manual, pero que si es factible en este banco.

El control en la ejecución y puesta a punto por el usuario final del banco permite versatilidad en los ensayos a realizar, así como flexibilidad y control en modificaciones futuras del mismo.

Como recomendación indicar que la utilización de materiales y equipos de calidad contrastada permite en este tipo de instalaciones una alta durabilidad y precisión.

## 5 Bibliografía

- AENOR (2010) UNE-EN ISO 9261:2010: Equipos de riego. Emisores y tuberías emisoras. Especificaciones y métodos de ensayo. (2010)
- Balbastre I., Sanchis L., Arviza J., (2009). Manual de utilización. Banco de emisores para riego localizado. INSID Alger
- National Instruments (2013). Ayuda y manuales de usuario LabVIEW 2013 FALL.
- National Instruments (2011). Getting Started with CompactRIO – Remotely Monitoring I/O.
- Endress+Hauser (2013). Información técnica. Termostato. Thermophant T TTR31, TTR35 Termostato para la medición, monitorización y control seguros de temperaturas de proceso.
- UTILCELL. (2013). User Manual. SGA/A & SGA/D. Strain Gauge / Load Cell Amplifier / Signal Conditioner.
- Turégano, J.V. (2014) Modelización del comportamiento hidráulico de una subunidad de riego localizado. Riunet: Repositorio Institucional de la UPV.



# NUEVA METODOLOGÍA PARA OPTIMIZAR LA PROGRAMACIÓN DEL RIEGO APROVECHANDO LA DIFERENCIA DE COTA ENTRE EL PUNTO DE SUMINISTRO Y EL DE CONSUMO

*Alonso Campos, J.C. (1) (P), Jiménez Bello, M.A. (2),  
Martínez Alzamora, F. (3), Bou Soler, V. (4)*

<sup>1</sup> Ing. Industrial, becario investigación, Inst. U. Ingeniería del Agua y M.A (IIAMA), Universitat Politècnica de València, Camino Vera, bq 5J, bajo 46022 Valencia, [joalcam@etsii.upv.es](mailto:joalcam@etsii.upv.es)

<sup>2</sup> Investigador Contratado, Inst. U. Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA), Universitat Politècnica de València. Camino de Vera, bq 5J, bajo 46022.Valencia. [mijibar@dihma.upv](mailto:mijibar@dihma.upv).

<sup>3</sup> Cat. Ing. Hidráulica, Instituto de Ingeniería del Agua y M.A (IIAMA), Universitat Politècnica de València, Camino Vera, bq 5J, bajo 46022 Valencia, [fmartine@hma.upv.es](mailto:fmartine@hma.upv.es)

<sup>4</sup> Ing. Informático, Investigador Contratado, Inst. U. Ingeniería del Agua y M.A (IIAMA), Universitat Politècnica de València, Camino Vera, bq 5J, bajo 46022 Valencia, [vibouso@dihma.upv.es](mailto:vibouso@dihma.upv.es)

## Resumen

El elevado consumo energético vinculado a la operación de redes de riego por goteo o aspersión, junto con el notable aumento de las tarifas eléctricas en los últimos años, ha propiciado el desarrollo de metodologías y estrategias orientadas a reducir el coste de explotación de dichas redes. Para las redes en las que el punto de suministro tiene una cota suficientemente elevada para alimentar algunas tomas en condiciones adecuadas de presión, puede obtenerse un importante ahorro energético si se aprovechan las horas en las que la electricidad es más cara para regar el máximo número de tomas posible sin hacer uso del bombeo. En el presente trabajo se ha desarrollado una metodología que maximiza el volumen aportado por gravedad en un determinado periodo de tiempo, a la vez que garantiza una presión mínima en cada punto de consumo, determinando para ello los instantes de inicio y fin de riego de cada parcela. La metodología se basa en la combinación de un Algoritmo Genético con la simulación hidráulica de la red en Epanet, y se ha implementado en el entorno de programación Visual Studio mediante el lenguaje de programación C#. La optimización se ha aplicado a dos casos reales alcanzando un incremento del volumen aportado del orden del 30% respecto de la situación actual.

## Abstract

The high amount of energy required for the operation of pressurized irrigation networks, and the increasing electric tariffs over the last years have led researchers to develop new methodologies and strategies focused on reducing the exploitation cost of these networks. Among irrigation networks there are many in which the head of the source node is high enough to deliver water to some takeoffs at the required pressure. For these cases, considerable savings can be obtained by performing the irrigation of the maximum number of takeoffs without pumping during the hours when energy is more expensive. In this work a new methodology was developed for maximizing the volume delivered by gravity during a specific time interval, while guaranteeing a minimum service pressure at each operating takeoff, by setting the instants when each takeoff starts and finishes irrigation. The methodology is based on combining a Genetic Algorithm with the hydraulic simulation of the network using the Epanet toolkit. It was developed in Visual Studio by means of the C#



programming language. The optimization was tested on two real cases and it was achieved a volume increase delivered by gravity of around 30% compared to the current situation.

## 1- Introducción

El proceso de modernización de los sistemas de riego en España ha acarreado un aumento del consumo energético en el sector del 1.900% entre 1950 y 2007 (Corominas 2010). Los sistemas de riego localizado y por aspersión permiten un ahorro en el consumo de agua pero precisan presiones de trabajo elevadas que suponen un consumo de energía mayor que los sistemas de riego por superficie (Santos et al. 2010, Rodríguez-Díaz et al. 2011).

Cuando el modo de operación de una red de riego es a la demanda, en general se han de sobredimensionar los elementos para prever las mayores pérdidas por fricción debido a la existencia de picos de demanda. Se ha demostrado que se pueden alcanzar ahorros considerables sustituyendo el sistema de riego a la demanda por un riego organizado por turnos (Rodríguez Díaz et al. 2009, Moreno et al. 2010, Jiménez-Bello et al. 2010, Jiménez-Bello et al. 2011, Carrillo Cobo et al. 2011, Navarro Navajas et al. 2012, Fernández García et al. 2013).

El resultado de sectorizar una red de riego desde el punto de vista del ahorro energético pasa por establecer tiempos de riego iguales para todas las parcelas de cada sector. Este hecho puede ser precursor de ineficiencias, puesto que el tiempo de riego necesario para cada una es generalmente distinto, y se calcula en base a las necesidades de riego de cada cultivo y al caudal base de la toma. Por ello, una alternativa a sectorizar la red es obtener una programación completa de los instantes de apertura y cierre de cada toma de manera que se minimice el consumo energético y al mismo tiempo se ajusten los tiempos de riego (Jiménez-Bello et al. 2013).

Por otra parte, las tarifas eléctricas de 3 o 6 periodos generalmente contratadas por las comunidades de regantes, presentan importantes diferencias de precio entre las horas valle y punta, pudiendo obtener considerables ahorros económicos si se evita activar el bombeo en las horas en que la energía es más cara. Un primer paso a tener en cuenta a la hora de generar una programación de riego es comprobar si en los puntos de suministro existe suficiente energía potencial (cota) para poder efectuar el riego de alguna parcela en condiciones adecuadas de presión sin el auxilio del bombeo. En estos casos pueden aprovecharse las horas en que la energía es más cara para regar dichas parcelas.

En el presente trabajo se ha desarrollado una metodología para la obtención de la programación de riego que maximiza el volumen de agua entregado sin aporte de energía durante un intervalo de tiempo predefinido.

## 2- Metodología

Dada una red de riego, con un número de puntos de suministro  $N_s$ , y un número de tomas  $N_t$ , se considerarán variables del problema aquellas tomas cuya diferencia de cota respecto del punto de suministro más elevado sea mayor que la presión mínima requerida de funcionamiento  $P_{min}$  (m.c.a). Se tienen por tanto un número de variables  $0 < N_v \leq N_t$ . Cada toma tendrá definido un caudal base  $Q_i$  que se considerará constante siempre que la toma esté abierta, y un tiempo de riego  $T_{ri}$ .

Se establece un intervalo de tiempo destinado al riego de las tomas sin aporte energético ( $T_{grav} < 24h$ ), y se discretiza en  $N_{int}$  intervalos de igual duración. El problema de optimización para un único intervalo de cálculo se plantea del siguiente modo:

$$\max f(x_1, x_2, \dots, x_{N_v}) = \sum_{i=1}^{N_v} x_i \cdot Q_i \quad (1)$$

Sujeto a:

$$P_i > P_{\min} \text{ si } Q_i > 0 \quad (2)$$

La ecuación 1 es la función objetivo. Las variables  $x_i$  toman valores binarios (0,1) que indican si la toma está abierta o cerrada. Cada toma abierta deberá disponer de presión suficiente para su correcto funcionamiento.

Una vez obtenido el resultado para un instante dado, las tomas que han resultado activadas permanecen en ese estado hasta que finaliza su tiempo de riego. El siguiente intervalo de tiempo en el que se efectuará la optimización coincide con el instante en que finaliza su tiempo de riego al menos una de las tomas activas. El proceso se repite hasta llegar al último intervalo de tiempo o bien todas las tomas consideradas han finalizado su tiempo de riego. Hay que destacar que en cada iteración del algoritmo el número de variables disminuye, puesto que dejan de considerarse las tomas que han iniciado el riego.

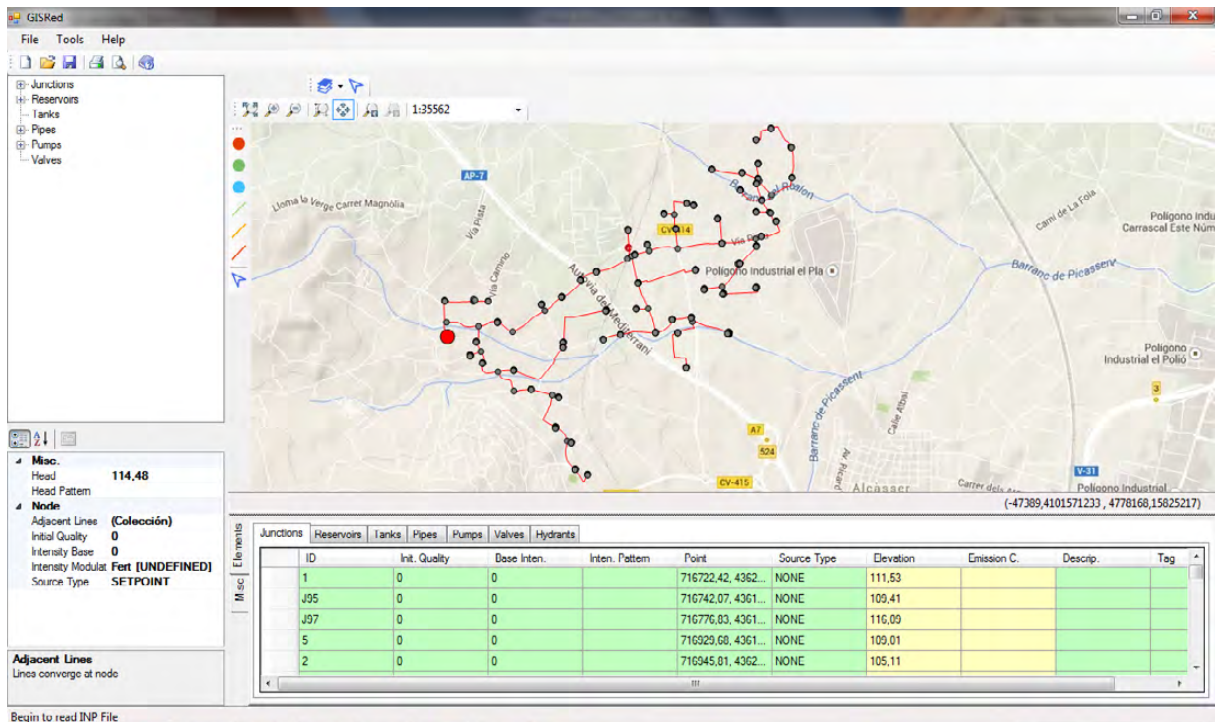
El proceso de optimización se ha programado en la plataforma .NET, apoyado en la simulación del modelo matemático de la red mediante Epanet (Rossman 2000), y en la implementación de un Algoritmo Genético (Goldberg & Kuo 1987), desarrollado sobre la base de la librería Aforge.Genetic.

La metodología expuesta se ha aplicado en dos casos de estudio. Puesto que se dispone de la programación actual en ambos casos, como paso previo se ha partido de la simulación de dichas programaciones y se han comparado los resultados con los obtenidos mediante la presente metodología. Por último se han comparado estos resultados con los obtenidos mediante la metodología descrita en Jiménez-Bello et al. 2013. Este método, basado también en la combinación de un Algoritmo Genético con la simulación hidráulica en Epanet, define las variables como el instante en el que cada toma inicia el riego. Por lo tanto, el número de variables coincide con el número inicial de variables del nuevo método, siendo en este caso las variables enteras.

### **3- Casos de estudio**

#### **3.1- Realón**

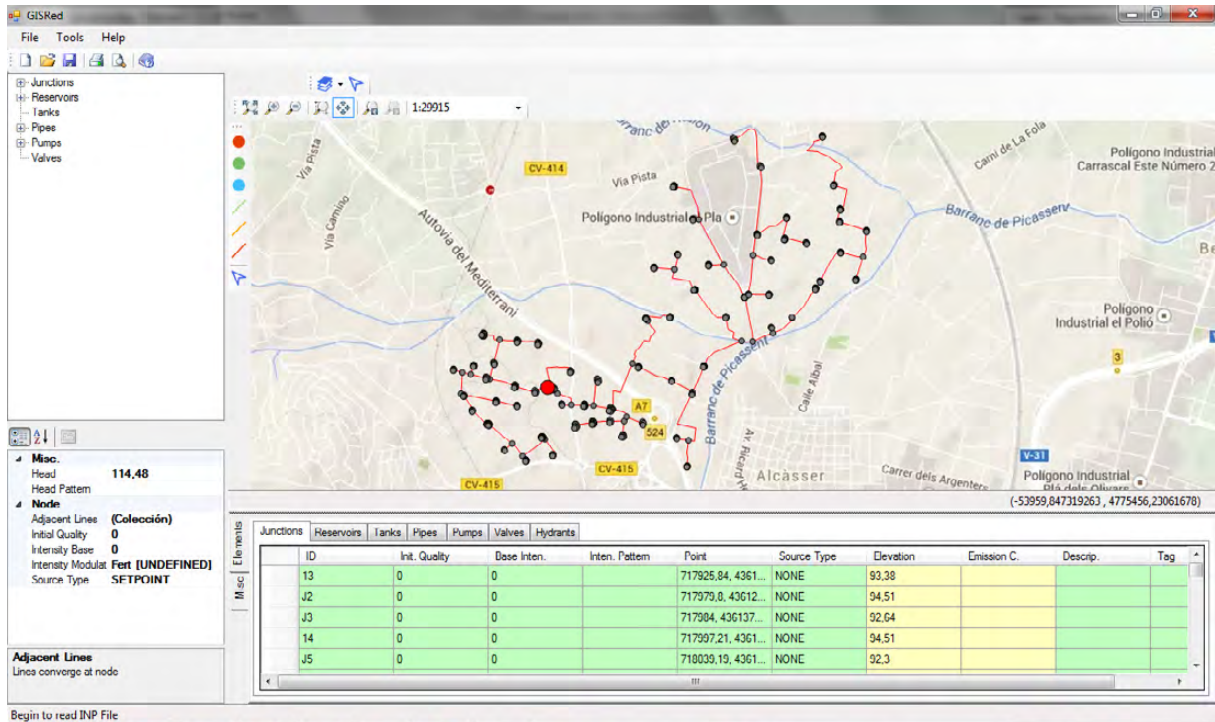
El primer caso de estudio es la red de riego de "Realón" en Picassent (Valencia) (Figura 1). La red cuenta con 62 hidrantes multiusuario con un total de 362 tomas y una balsa de regulación en cabecera. Se ha establecido una presión mínima de 25 mca en todas las tomas. El número de tomas cuya diferencia de cota con la balsa es mayor de 25 m es de 191 (número inicial de variables). El periodo de tiempo destinado al riego sin aporte energético es de 14 horas (de 10:00 a 24:00), y se ha discretizado en intervalos de 5 minutos.



**Figura 1.** Red de riego de Realón

### 3.2- Camí de Torrent

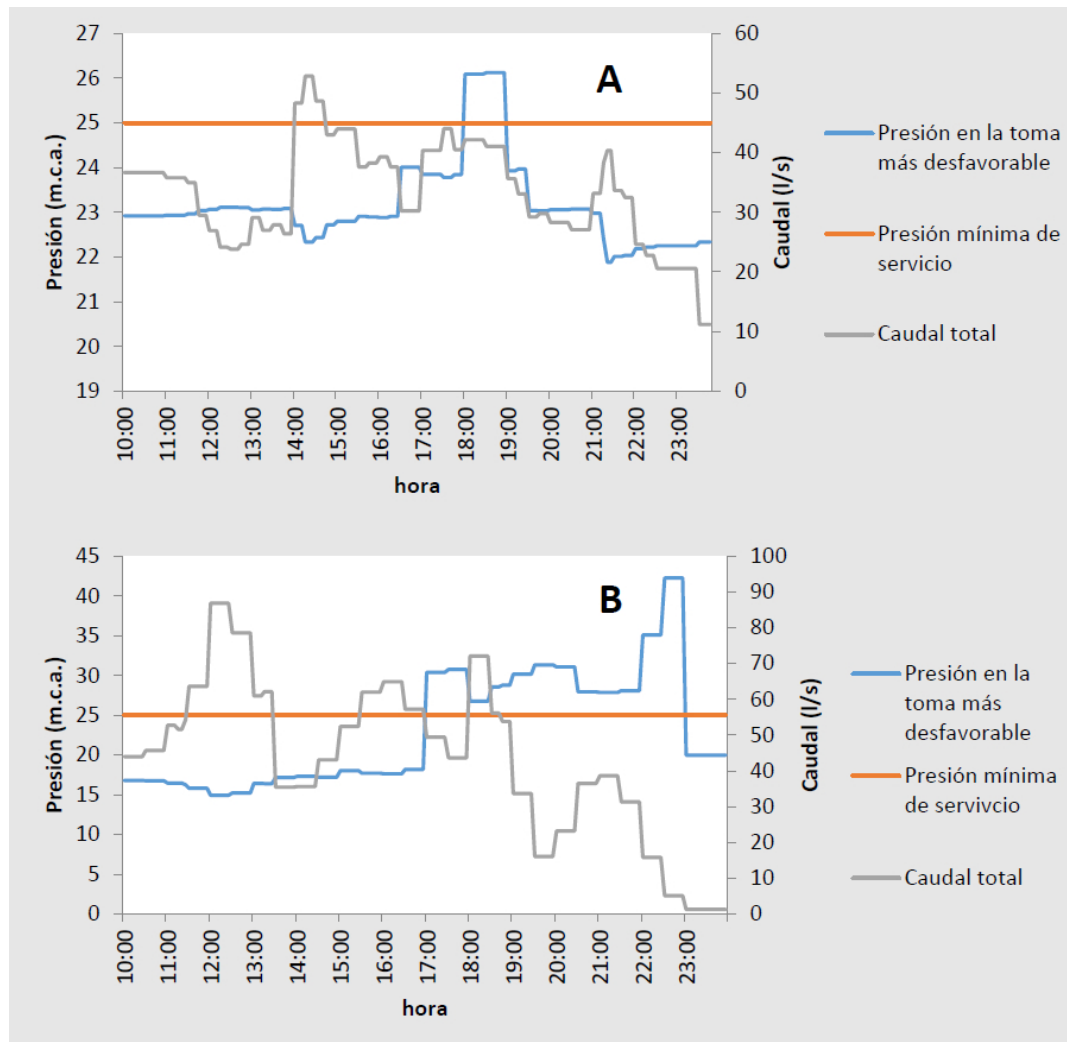
La red de riego “Camí de Torrent” en Picassent (Valencia) constituye el segundo caso de estudio (Figura 2). Se trata de una red de características similares a la de Realón, en este caso con 68 hidrantes y un total de 327 tomas, de las cuales 247 han sido consideradas como variables del problema. Se han definido los parámetros temporales idénticos a los de la red de Realón. En ambos casos son redes actualmente operadas según una programación definida por el personal responsable de la operación, mediante criterios basados en la homogeneización del caudal total. Las presiones mínimas de servicio se garantizan mediante prueba y error.



**Figura 2.** Red de riego Camí de Torrent

#### 4- Resultados

Los resultados presentados en la Figura 3 se corresponden con el análisis de la programación actual. Se concluye que la presión mínima de servicio en cada punto de consumo (25 m.c.a.) en general no está garantizada en todo momento. En total hay 20 tomas en el caso de Realón y 50 en el caso de Camí de Torrent que presentan una presión inferior a la mínima de servicio. Por otra parte el volumen total entregado a lo largo de las 14 horas de riego sin aporte de energía es de 2.172 m<sup>3</sup> en la red de Camí de Torrent y de 1.635 m<sup>3</sup> en la de Realón.

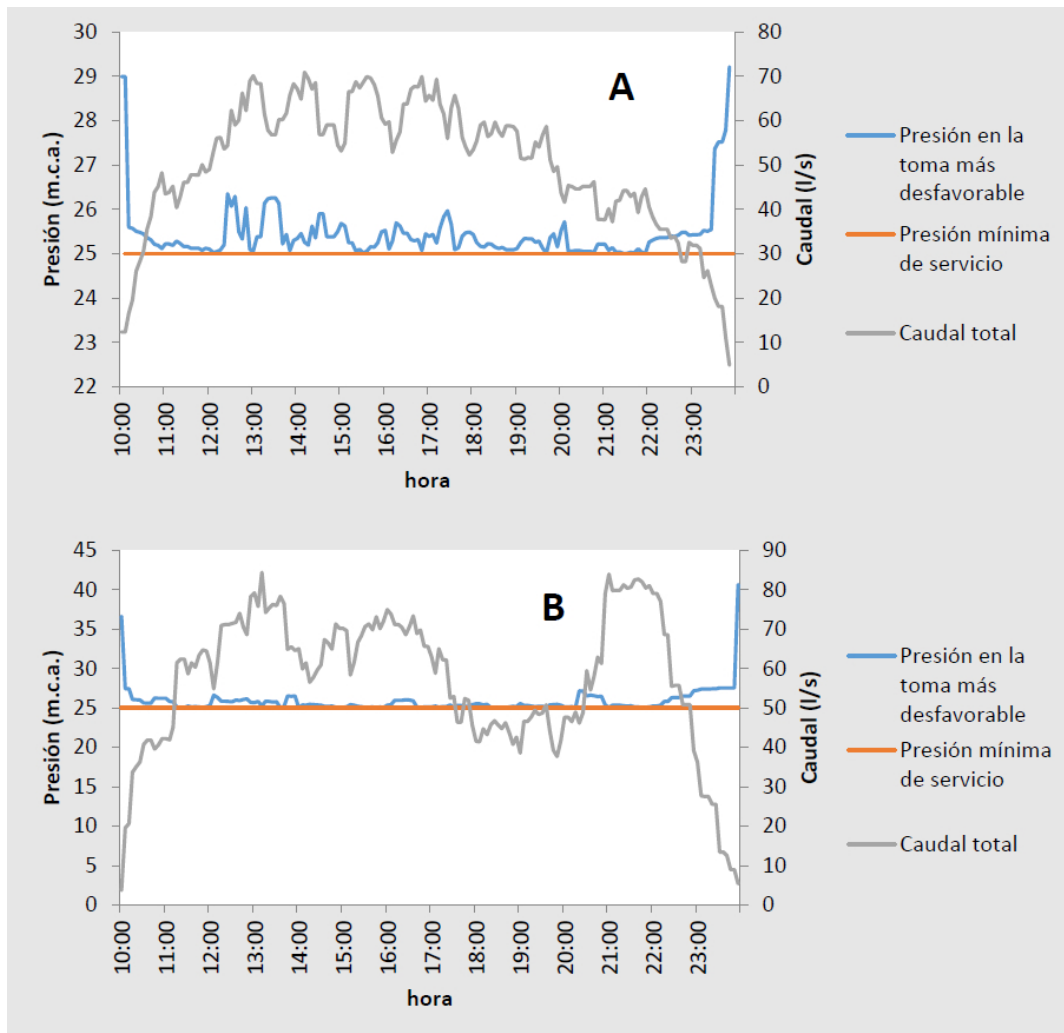


**Figura 3.** Resultados de simular la programación de riego actual. Red de Realón (A). Red de Camí de Torrent (B)

En cuanto a los resultados obtenidos siguiendo la metodología propuesta en Jiménez-Bello et al. 2013 (Figura 4) se ha alcanzado un suministro de 2.514 m<sup>3</sup> en el caso de Realón y de 2.864 m<sup>3</sup> en el caso de Camí de Torrent. En ambos casos todas las tomas activas presentan una presión igual o superior a la mínima de servicio. El tiempo de cálculo de las soluciones presentadas es del orden de 2 - 3 horas<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Cálculos realizados en un ordenador ACER Aspire 5920G, procesador Intel Core 2 Duo a 2 GHz, 4 GB de RAM.





**Figura 4.** Resultados optimización mediante la metodología descrita en (Jiménez-Bello et al. 2013). Red de Realón (A). Red de Camí de Torrent (B)

Siguiendo el método expuesto en el presente trabajo se ha logrado suministrar un volumen de 2.517,2 m<sup>3</sup> en la red de Realón y de 2.908,4 m<sup>3</sup> en Camí de Torrent a lo largo de las 14 horas de riego sin bombeo. Este valor supone un aumento del 53,95% y del 30,37% respecto de la situación actual, y un ligero aumento respecto del resultado obtenido mediante el método anterior. Se observa en los resultados que en la metodología anterior el caudal total es más homogéneo a lo largo de la jornada, mientras que la nueva metodología tiende a concentrar mayores caudales al principio del periodo de optimización.

El volumen máximo teórico que podría suministrarse por gravedad es de 2.673 m<sup>3</sup> para el caso de Realón, y de 3.004 m<sup>3</sup> para el de Camí de Torrent. Por lo tanto se ha alcanzado un 94,1% y un 96,8% respectivamente del máximo potencial.

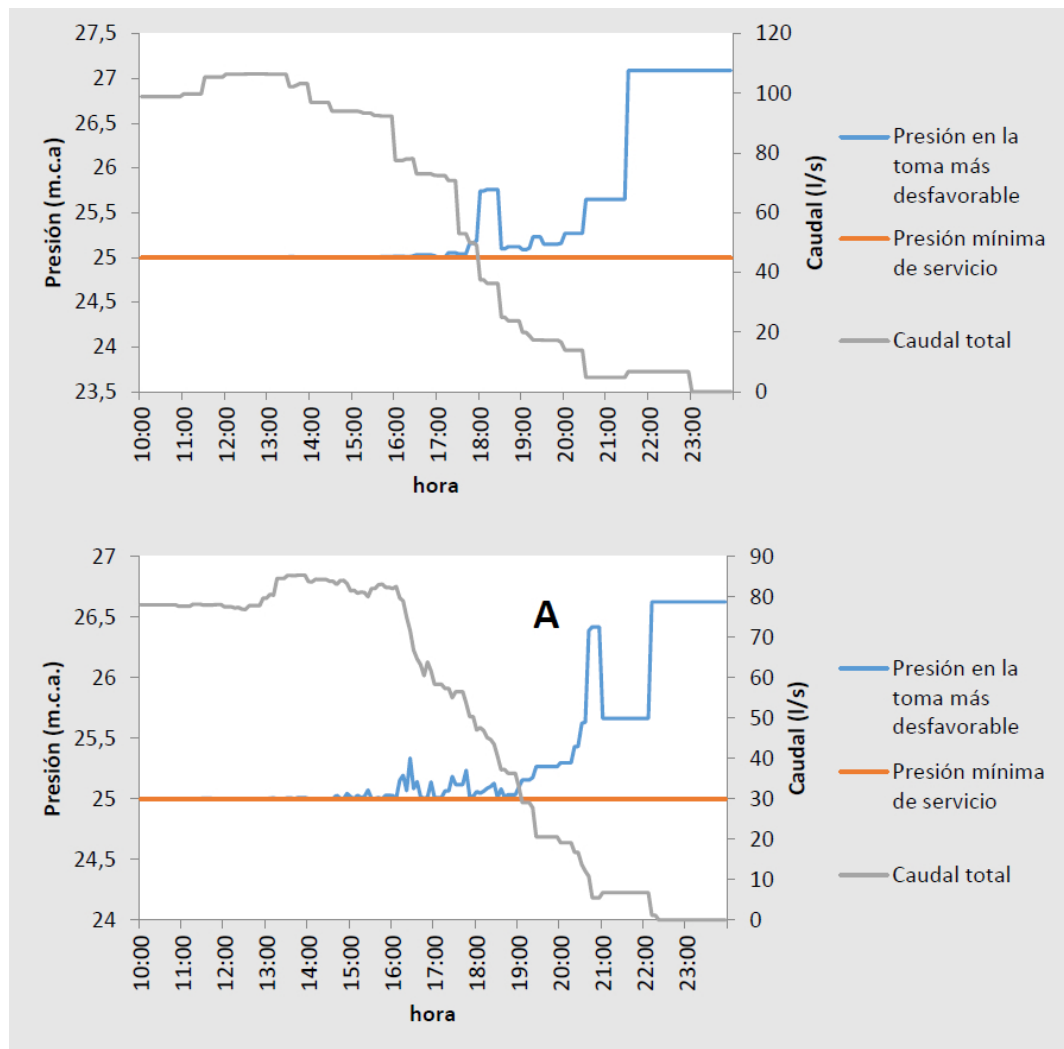
El aumento del volumen suministrado por gravedad conllevará una reducción del volumen bombeado en las horas nocturnas, con el consiguiente ahorro energético. A su vez la reducción del caudal bombeado permitirá disminuir la presión de consigna debido a las menores pérdidas de carga en la red. Finalmente se puede obtener aún otro ahorro adicional si se consigue que la estación de bombeo trabaje en todo momento en puntos de funcionamiento eficientes.

Además, mediante esta metodología se ha garantizado en todo momento la presión mínima en las tomas activas (Figura 5).



Por otra parte, si se analiza la curva de caudal total se puede concluir que las tomas que se activan en último lugar son las más restrictivas en cuanto a la penalización de la presión de funcionamiento. Por lo tanto, la presente metodología aporta información acerca de los puntos críticos de la red.

El tiempo de cálculo empleado para optimizar el riego por gravedad ha sido inferior a 15 minutos. Esto supone dividir por 10 el tiempo necesario mediante la anterior metodología, con lo que el nuevo método podría ser de aplicabilidad en la operación de redes en tiempo real.



**Figura 5.** Resultados optimización mediante la nueva metodología. Red de Realón (A). Red de Camí de Torrent (B)

## 5- Conclusiones

Se ha desarrollado una metodología para la obtención de una programación de riego que maximiza el volumen total entregado sin aporte de energía en un determinado intervalo de tiempo, a la vez que garantiza una presión mínima en las tomas activas.

Siguiendo el método expuesto se han obtenido resultados para dos casos de estudio que incrementan el volumen entregado alrededor de un 30%, presentando presiones de trabajo mayores que la deseada en cada instante.



Con esta nueva metodología se ha logrado reducir el tiempo de cálculo a una magnitud que lo hace adecuado para la optimización en tiempo real de redes de riego.

Los resultados aportados por el algoritmo ofrecen implícitamente información sobre los puntos más críticos de la red.

## 6- Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Proyecto Europeo FIGARO (Flexible and precise irriGation pLatform to improve faRm scale water prOductivity), dentro del 7º Programa Marco, en el ámbito “Precision technologies to improve irrigation management and increase water productivity in major water-demanding crops in Europe” (KBBE.2012.1.1-03).

## 7- Bibliografía

- Carrillo Cobo, M.T. et al., 2011. Low energy consumption seasonal calendar for sectoring operation in pressurized irrigation networks. *Irrigation Science*, 29(2), pp.157–169.
- Corominas, J., 2010. Agua y Energía en el riego en la época de la sostenibilidad. *Ingeniería del Agua*, 17(3).
- Fernández García, I. et al., 2013. Optimal Operation of Pressurized Irrigation Networks with Several Supply Sources. *Water Resources Management*, 27(8), pp.2855–2869.
- Goldberg, D.E. & Kuo, C.H., 1987. Genetic Algorithms in Pipeline Optimization. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 1(2), pp.128–141.
- Jiménez-Bello, M. a. et al., 2010. Methodology for grouping intakes of pressurised irrigation networks into sectors to minimise energy consumption. *Biosystems Engineering*, 105(4), pp.429–438.
- Jiménez-Bello, M.A. et al., 2013. A methodology to improve water and energy use by network sectoring and proper irrigation scheduling. In *7th IWA International Conference on Efficient Use and Management of Water*. Paris, pp. 1–11.
- Jiménez-Bello, M.Á. et al., 2011. Validation of a methodology for grouping intakes of pressurized irrigation networks into sectors to minimize energy consumption. *Agricultural Water Management*, 102(1), pp.46–53.
- Moreno, M.A. et al., 2010. Energy efficiency of pressurised irrigation networks managed on-demand and under a rotation schedule. *Biosystems Engineering*, 107(4), pp.349–363.
- Navarro Navajas, J.M. et al., 2012. Impacts of irrigation network sectoring as an energy saving measure on olive grove production. *Journal of Environmental Management*, 111, pp.1–9. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.06.034>.
- Rodríguez Díaz, J.A. et al., 2009. Exploring energy saving scenarios for on-demand pressurised irrigation networks. *Biosystems Engineering*, 104(4), pp.552–561.
- Rodríguez-Díaz, J.A. et al., 2011. The paradox of irrigation scheme modernization: more efficient water use linked to higher energy demand. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 9(4), pp.1000–1008.



XXXIII Congreso Nacional de Riegos  
Universitat Politècnica de València, Valencia 2015  
DOI:<http://dx.doi.org/10.4995/CNRiegos.2015.1518>

Rossman, L. a, 2000. EPANET 2: users manual. *Cincinnati US Environmental Protection Agency National Risk Management Research Laboratory*, 38(September), p.200.  
Available at: <http://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/P1007WWU.pdf>.

Santos, L. et al., 2010. *El Riego Y Sus Tecnologías Europa-Amé.*, Lisboa.



## ENSAYOS Y CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA DE TUBERÍAS POROSAS PARA RIEGO

*Casado Fernández, E. (1) (P), Juana Sirgado, L. (2)*

<sup>1</sup> Investigador, E.T.S. Ingenieros Agrónomos, UPM, Dpto. Ing. Agroforestal. Avda. Complutense 3, 28040 Madrid. [eduardo.casado.fernandez@alumnos.upm.es](mailto:eduardo.casado.fernandez@alumnos.upm.es)

<sup>2</sup> Profesor Titular, E.T.S. Ingenieros Agrónomos, UPM, Dpto. Ing. Agroforestal. Avda. Complutense 3, 28040 Madrid. [luis.juana@upm.es](mailto:luis.juana@upm.es)

### Resumen.

El presente trabajo pretende profundizar en el estudio del desagüe de las tuberías porosas, aportando ideas para su caracterización hidráulica y para la determinación de las circunstancias en las que pueden presentar un mayor potencial. Se presentan los primeros resultados experimentales con diferentes materiales y se discute sobre el funcionamiento y resultados de las mismas en posibles instalaciones. Se han realizado ensayos de caracterización de la curva de desagüe, presión-caudal, distribución de presiones y de gastos a lo largo de la tubería y se ha observado la porosidad bajo lupa binocular.

### Summary

This work intends to start an in-depth study of porous pipes, delivering ideas for their hydraulic characterization, and for defining the conditions under they can be used with better results. In this paper first batch of experimental data is shown. Results have been obtained with different types of porous pipes (textile and extruded from reclaimed rubber and recycled plastic binder). Experiments have been carried out about flow-discharge features, pressure-flow correspondence, and pressure/flow distribution along pipes. Porous pipes have been also observed with a stereo microscope.

### **1) Introducción. Objetivos.**

Con el fin de poder valorar las posibilidades de las tuberías porosas de incrementar su presencia en los regadíos agrícolas actuales, se considera necesario profundizar en el funcionamiento de este sistema de riego localizado con bajo requerimientos de energía.

La información técnica suministrada por los fabricantes de los materiales de este método de riego es escasa, por comparación con la ofrecida en otros métodos, y, en algunos casos, resulta insuficiente para realizar un proyecto de riego justificado.

A diferencia con un gotero, que tiene un único punto de emisión, la multitud de puntos de emisión de las tuberías porosas le confieren ventajas e inconvenientes a su comportamiento hidráulico y, a aspectos puntuales del mismo, como los relacionados con la obturación. En este sentido, la mayor humectación del suelo puede ser beneficiosa para algunos cultivos y también, en riego subsuperficial y en lo que se refiere a la obturación por raíces, puede presentar ventajas, pues aun llegando a penetrar las raíces en el interior, los pelos radiculares no progresan en su crecimiento tal como se ha observado con raíces de gramíneas en muestras del material extraídas de instalaciones.

En el mercado existen básicamente dos tipos de tuberías porosas:

- las fabricadas por medio de extrusión de agregados procedentes del reciclaje de neumáticos (denominadas a continuación con el acrónimo TPE);
- las fabricadas mediante proceso textil (denominadas a continuación con TPT).

Las primeras presentan un interés adicional servir para el reciclado de un elemento problemático a nivel medioambiental. Actualmente se comercializan fundamentalmente en paisajismo y jardinería y en riegos hortícolas con pequeña superficie.

Ambos tipos de tuberías emisoras, presentan características distintas que conviene determinar mediante procedimientos experimentales, siendo necesario avanzar en la determinación de procedimientos de ensayo específicos, los cuales en un futuro, convendría normalizar de cara a tener una mayor garantía sobre sus determinaciones.

Teeluck, M. y Sutton, B.G. (1998), estudian experimentalmente la variación del gasto desaguado en una TPE, concluyendo que la tubería estudiada no posee las cualidades adecuadas como ramal de riego debido a su alto coeficiente de variación, del 0.20 a 0.35, que además aumento con el paso del tiempo.

En un estudio más reciente, Pinto *et al* (2014) ensayan una TPE y concluyen que a todas las presiones ensayadas se obtuvo un resultado satisfactorio del coeficiente de variación (valores próximos a 0.05). Asimismo, observaron unas pérdidas de carga que no parecían corresponder con las obtenidas por las expresiones clásicas y una curva de gasto que no era bien representada por la expresión potencial típica y proponiendo otra más compleja, también empírica, que ajustaba mejor sus resultados experimentales.

En este trabajo, como un primer paso para el estudio de este tipo de materiales, se pretende la realización de los ensayos clásicos del riego por goteo en estas tuberías y su interpretación. En particular, se pretende:

1. Caracterización de la curva de desagüe, presión-caudal.
2. Caracterización de la distribución de presiones y de gastos a lo largo de la tubería y, en especial, caracterización de las pérdidas de carga frente al caudal entrante en relación con la longitud de tubería.
3. Observación bajo lupa binocular de la porosidad y caracterización de esta en la pared de las tuberías emisoras.

## 2) Material y métodos.

Se han realizado ensayos con cuatro tipos de tuberías diferentes, tres de fabricación textil y una tubería de extrusión de agregados de caucho reciclado (de distinto fabricante a las utilizadas en los trabajos referidos). Los ensayos se han llevado a cabo en el Laboratorio de Hidráulica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de Madrid.

### Curva presión-caudal.

Para determinar la curva de desagüe, presión-caudal, para cada tipo de tubería se cortaron y colocaron cuatro tramos de un metro de longitud alimentados desde una tubería con presión prácticamente constante en toda su longitud, ver imagen 1. El tramo de un metro de tubería porosa, en ocasiones se conectó en el desagüe de un gotero a su vez conectado a la tubería de alimentación se fue aumentando, en cada ensayo, con la tubería



en incrementos de 5 en 5 kPa desde cero hasta un valor máximo en función de la tubería ensayada y luego reduciéndose otra vez, con el mismo incremento, hasta llegar de nuevo a cero. La presión de alimentación se midió con manómetro de precisión con sensibilidad de 1 kPa. Adicionalmente, en un extremo de cada tubería se midió la presión con manómetro digital con una sensibilidad de 1 mm. Para medir el gasto o volumen desaguado por unidad de tiempo se usó un cronómetro y probetas de un litro, con divisiones de 10 ml. Dado que en ocasiones se producía la emisión de chorros, la tubería se introdujo dentro de una tubería de PVC de 50 mm de diámetro que recogía el volumen y se colocó con una ligera inclinación para favorecer el desagüe a la probeta

**Imagen.1.** Banco de ensayos para obtener la curva de gasto.

### **Pérdidas de carga y distribución de gasto a lo largo de la tubería.**

Para los ensayos de pérdida de carga y la distribución de gasto a lo largo de la tubería se extendió una longitud de entre 40 m hasta 100 m, según tipo de material. El caudal se midió con un cronómetro y un contador volumétrico con una sensibilidad de 0.1 L y de 1.500 L/h de caudal nominal. Las pérdidas de carga entre cabeza y cola se midieron con un manómetro digital diferencial con sensibilidad de 1 mm y la presión en cabeza con manómetro digital con sensibilidad e 1 mm. El caudal a lo largo de la tubería se midió en tramos de un metro a intervalos de 10 o 20 m, según tipo y longitud de tubería, con un procedimiento similar al comentado en la curva presión-caudal. Para cada material se realizaron varios ensayos a distintas presiones modificando la velocidad de giro de la bomba que alimenta el banco de ensayos y/o con la ayuda de llaves de paso en la misma tubería y/o en derivaciones, ver imagen 2.



**Imagen 2.** Banco de ensayos para ramales.

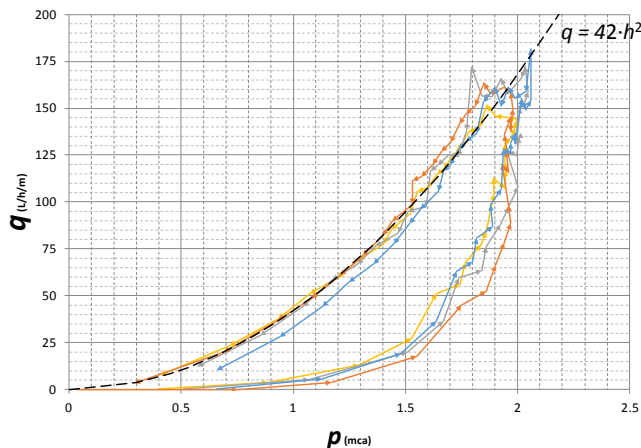
Para obtener las imágenes de la tubería, se ha empleado una lupa binocular con un aumento 20x, equipada con una cámara de 5 megapixels.



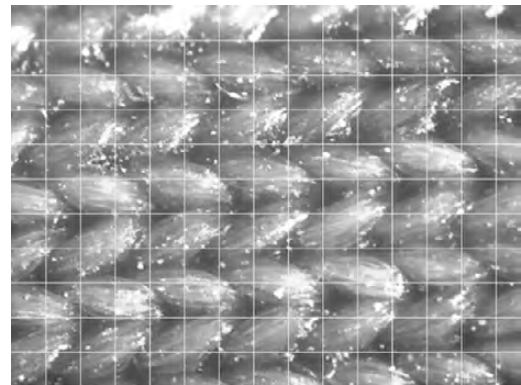
### 3) Resultados.

#### TPT1

El ensayo de la curva de gasto en la TPT1, mostró una importante histéresis. En la fase de caudales crecientes, a una presión próxima a 2 m, el caudal se incrementó exponencialmente, ver figura 1. El caudal de la fase decreciente fue considerable más alto con un exponente de la ecuación de desagüe próximo a 2.



**Figura 1.** Curva de gasto, tubería TPT1



**Imagen 3.** Tubería porosa textil TPT1 (malla 200µ).

La justificación del aumento exponencial de la descarga tiene que estar relacionado con el aumento de los poros que desaguan al aumentar la presión. Para que el agua empiece a salir por un poro en contacto con la atmósfera, supuesto circular, es necesario que la presión  $p$  en la tubería sea mayor de  $4\sigma/d$ , para vencer la sobrepresión que, por la energía superficial  $\sigma$  se formaría en un menisco convexo de diámetro  $d$ , o dicho de otra forma, para cada presión desaguarán únicamente los poros mayores de un tamaño mínimo  $d_{\min} = 4\sigma/p$ . El diámetro para  $p = 2$  m, sería aproximadamente unas 15  $\mu\text{m}$  (en la imagen 4, se muestra la pared de la tubería, en la que se observa claramente el patrón uniforme de la distribución de las fibras además de su tamaño). Cabe esperar que cuando desagüe un número importante de los poros se forme una película de agua alrededor de la tubería que elimina el menisco y, como consecuencia, desaguarían todos los poros. La fase decreciente sale un caudal mayor dado que al estar saliendo agua no debe vencerse la sobrepresión del menisco.

Si en la fase de presión decreciente desaguan la mayoría de los poros, el alto exponente de la ecuación de desagüe,  $x = 2$ , hace pensar asimismo que la dilatación de la pared de la tubería es significativa. Las variaciones entre los cuatro ramales, aunque no es un número bajo de repeticiones, presentó valores de CV alrededor de 0.10 cuando las presiones eran mayores de 0.5 m, siendo mayores para las presiones muy pequeñas.

Un aspecto determinante es el alto caudal desaguado lo que imposibilita proyectar grandes longitudes con el diámetro de la cinta  $D = 16$  mm. Sería necesario reducir el caudal hasta 20 veces para poder alcanzar longitudes de unos 50 m a una presión de aproximadamente 1 m. No obstante, reducir más la presión no sería conveniente puesto que los pequeños desniveles reducirían mucho la uniformidad.

Los ensayos en ramales y las pérdidas de carga están muy condicionados por las importantes diferencias de gasto entre el primer tramo del ramal y el último.

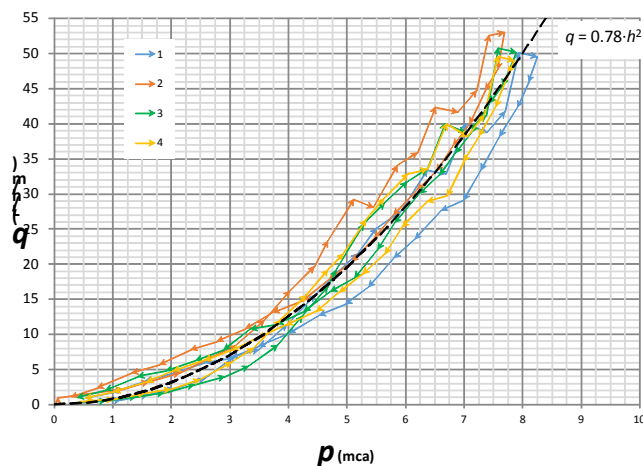
### Tubería TPT2 y TPT3

Ambas tuberías son similares si bien la primera está pensada para trabajar a mayor presión que la segunda.

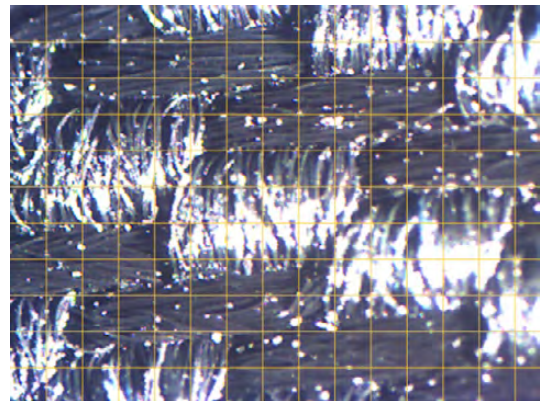
La tubería TPT2 ha presentado también algo de histéresis, ver figura 2, pero además de ser considerablemente menor, en este caso el gasto de la fase creciente, en algunos tramos, ha sido algo mayor que el de la fase decreciente. La variación del gasto con la presión también ha sido muy importante,  $x \cong 2$ , lo que, de aceptar el razonamiento dado en TPT1 indicaría asimismo que hay una influencia significativa de la dilatación.

El caudal desaguado es mucho más reducido que en la TPT1, la curva ajustada, tiene el mismo exponente que la representada anteriormente pero un coeficiente 54 veces menor. En la pared, imagen 5, se aprecia de una forma nítida el patrón de las fibras, y como éstas son de mayores dimensiones que las que aparecen en la Imagen 4, por lo que puede deducirse que el número de poros por unidad de superficie es menor en esta tubería.

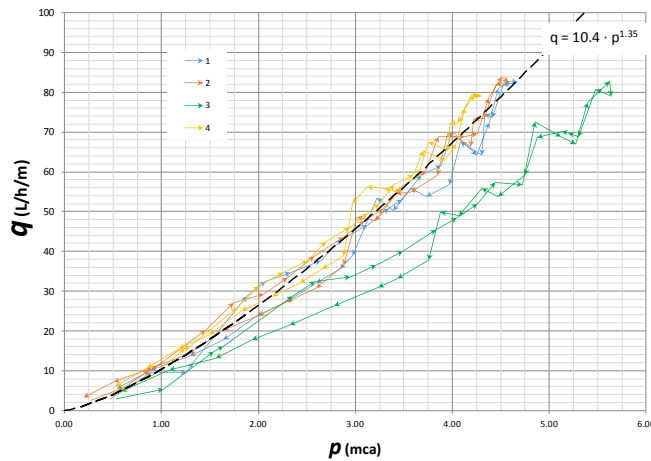
Las desviaciones promedio relativas de los caudales observados con respecto a la curva de ajuste única representada han sido 0,22, si bien, este valor se reduce a 0,14 para las presiones mayores de 2 m y a 0,11 para las mayores de 4 m. Como consecuencia, si bien, los valores son más altos de lo que es frecuente en riego por goteo los resultados podrían ser aceptables si se mantienen las características.



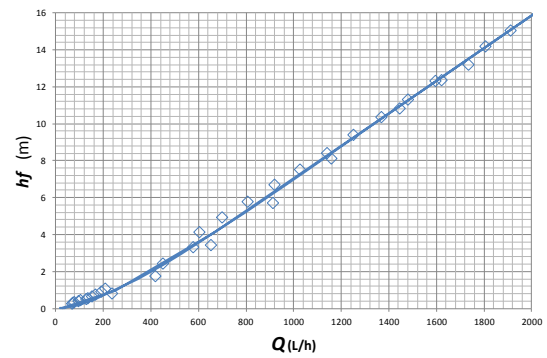
**Figura 2.** Curva de gasto, tubería TPT2



**Imagen 5.** Tubería porosa textil TPT2 (malla 200µ).



**Figura 3.** Curva de gasto, tubería TPT3



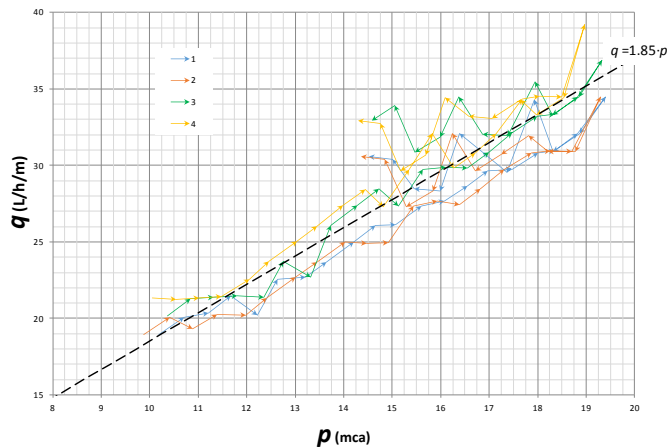
**Figura 4.** Curva de caudal pérdidas de carga obtenida en la tubería TPT2 y ajustada con las expresiones clásicas.

La TPT3 ha presentado también menor histéresis (ver **Figura 3**), pero uno de los tramos ensayados ha dado un gasto significativamente distinto a los otros tres. La variación del gasto con la presión ha sido importante pero menor que en las dos anteriores,  $x \approx 1.35$ , lo que, lo que indicaría una influencia de la dilatación pero menor, quizás pueda ser un resultado de haber alcanzado una menor presión máxima. Las desviaciones promedio relativas de los caudales observados con respecto a la curva de ajuste única pintada eliminando el tramo 3 ha sido 0,09, reduciéndose a 0,065 si se limita a las presiones mayores de 2 m. Como consecuencia, si bien, los valores son más altos de lo que es frecuente en riego por goteo los resultados podrían ser aceptables si se mantienen las características.

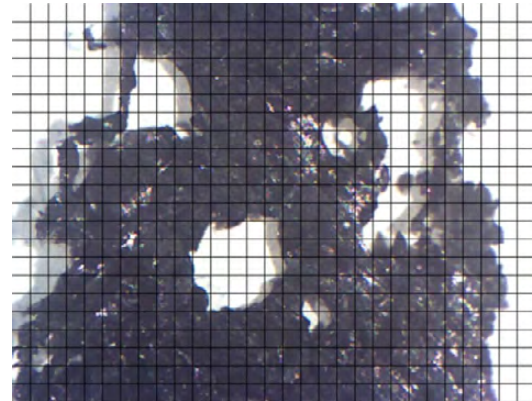
Los primeros ensayos en ramales, han dado unas curvas de caudal frente a pérdidas de carga (ver **Figura 4**), que si bien han podido ser simuladas con el estudio iterativo clásico del ramal (las diferencias de presión han sido superiores a las que permiten usar el factor de reducción de Christiansen), ha sido necesario modificar los parámetros obtenidos previamente en la curva de gasto y usar unos factores de rozamiento muy superiores a los que cabría esperar. No obstante, también depende de los datos de las observaciones que se consideren para simular y los que se consideren para contrastar. Los resultados no se presentan con detalle pues se considera conveniente su revisión.

### Tubería Porosa de Extrusión (TPE)

La TPE ha presentado un pequeño efecto de histéresis (ver **Figura 5**), con caudales ligeramente mayores en la fase decreciente (un coeficiente 1,91 frente a 1,81). La variación del gasto con la presión ha presentado un exponente propios del flujo en régimen laminar,  $x \approx 1$ , que si es así el flujo por la compleja porosidad, ver imagen 6, indicaría que no hay influencia significativa de la dilatación.



**Figura 5.** Curva de gasto, tubería TPT2

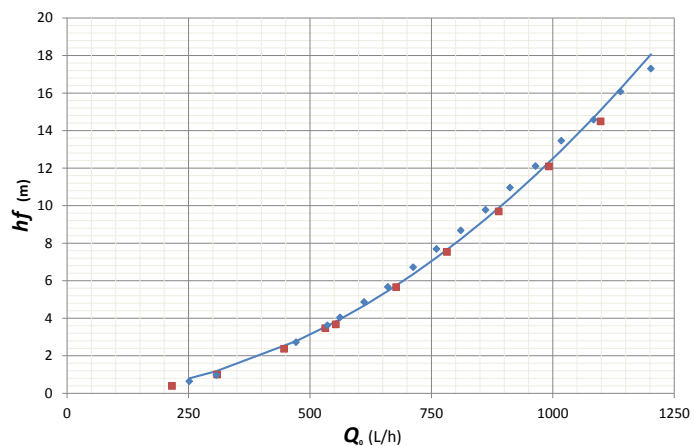


**Imagen 6.** Porción de una sección transversal de la tubería porosa extruida (malla 100µ).

Las desviaciones promedio relativas de los caudales observados con respecto a la curva de ajuste única pintada ha sido 0.058 lo que indicaría unas desviaciones razonables entre los cuatro tramos medidos.

En lo que se refiere a las pérdidas de carga, en este caso, el factor de reducción de Christiansen ha permitido un buen ajuste (ver **Figura 6**). Si bien, han presentado una aspereza importante. La expresión de Blasius, típica en ramales de riego por goteo, debido a que la tubería es muy áspera no ha resultado adecuada, siendo preferible una expresión de turbulencia completa.

En lo que se refiere a las variaciones del caudal a lo largo del ramal, las diferencias, aunque considerablemente menores, que en casos anteriores, han resultado importantes por lo que asimismo van a ser estudiadas con más precisión y, si ha lugar, se propondrá método para reducirlas. Se ha obtenido un efecto de histéresis en la descarga media del ramal de 3,5 m de longitud que se redujo al sumergir la tubería. Los resultados no se han introducido, al considerarse necesaria su verificación y revisión



**Figura 6.** Pérdidas de carga en función del caudal desaguado en una tubería porosa de extrusión. Curva de ajuste con exponente 2.

## Conclusiones.

En las tuberías de fabricación textil, la ecuación de desagüe ha mostrado una gran dependencia con la presión. Son necesarios exponentes próximos a 2 e incluso mayores



para situaciones en las que por estar seca la tubería el agua para salir del poro deba vencer la presión del menisco convexo.

El caudal desaguado es, en algunas de ellas, excesivo para poder disponer de longitudes razonables con presiones prácticas que no sean afectadas por pequeñas irregularidades del terreno. La variabilidad del desagüe achacable a la fabricación de la tubería ha presentado también valores más altos de los deseados. Si bien, el contacto de la tubería con el suelo y el cómo se humedezca la tubería, pueden tener efecto en el caudal desaguado.

Los resultados obtenidos con la fabricada por extrusión muestran una curva de gasto con menor dependencia de la presión. Por otra parte, un menor caudal desaguado para presiones moderadas, les hace potencialmente más aptas para el riego con unidades grandes. Por el contrario, en lo que se refiere a las pérdidas de carga, han presentado una aspereza importante. La expresión de Blasius, típica en ramales de riego por goteo, no ha resultado adecuada, siendo preferible una expresión de turbulencia completa.

El fenómeno de histéresis en la ecuación de desagüe, no en la de pérdidas de carga, puede estar relacionado con la curvatura de las gotas al salir, pues éste se ha reducido considerablemente sumergiendo la tubería, resultando en ese caso una curva de gasto próxima a la que se ha obtenido en la fase de descenso

Parece necesario estudiar en mayor detalle los ensayos a realizar, la forma y los parámetros a determinar y como usar luego esa información para maximizar la predicción empleando este tipo de materiales de riego.

#### 4) Bibliografía.

- Amin, M.S.M., Lim, C.W. and Zakaria, A. A. (1998). Flow Characteristics of a Porous Pipe Irrigation Lateral. *Pertanika J. Sci. & Technol.*6(1): 37 - 46 (1998)
- Pinto, Marinaldo F., de Camargo, Antonio P., Neto, Osvaldo R. & Frizzone, José A. (2014). Caracterização hidráulica de tubos porosos oriundos de pneus reciclados utilizados em irrigação subsuperficial. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* v.18, n.11, p.1095–1101, 2014
- Teeluck, M., Sutton, B.G. (1998). Discharge characteristics of a porous pipe microirrigation lateral. *Agricultural Water Management* 38 123±134
- Tock, Richard Wm and A'hern, Daniel W (2003). Considerations for manufacture of irrigation pipe. *Advances in Polymer Technology*, Volume 2, Issue 3, pages 177–185.





## EFFECTO DEL NÚMERO DE CAMPAÑAS DE USO EN LA UNIFORMIDAD DE DISTRIBUCIÓN DE CAUDAL EN CINTAS DE RIEGO

*Contreras París, J.I.<sup>1</sup> (P), González Expósito, L.<sup>2</sup>, Cánovas Fernández, G.<sup>1</sup>, Baeza Cano R.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera de Andalucía (IFAPA), Centro La Mojonera, Camino San Nicolás, nº1, 04745 La Mojonera, Almería.

[juanai.contreras@juntadeandalucia.es](mailto:juanai.contreras@juntadeandalucia.es)

<sup>2</sup> Primaflor, SAT

### Resumen

El objetivo de este trabajo fue estudiar el efecto del número de campañas de uso sobre la uniformidad de distribución de caudal en una cinta de riego con emisores con compensación de caudal, con el fin de determinar su vida útil. El experimento se ha desarrollado en el laboratorio de materiales de riego localizado, situado en las instalaciones del Centro IFAPA La Mojonera en La Cañada (Almería). El dispositivo experimental instalado consistió en un banco de pruebas de cintas de riego de 40 m de longitud. Se evaluó el comportamiento de un modelo de cinta de riego con emisores autocompensantes de uso frecuente en el cultivo de lechuga (DripNet PC™ de Netafim). Se estableció un diseño experimental con siete tratamientos y tres repeticiones donde la unidad experimental básica fue un lateral de cinta de riego con 200 salidas. Los tratamientos estudiados fueron los números de ciclos de cultivo de lechuga (1, 2, 3, 5, 6, 8 y 10 usos) y las repeticiones las presiones de trabajo (0.10, 0.15, 0.20 MPa). Los resultados han permitido establecer una función preliminar que define la relación entre la uniformidad de riego y el número de usos para el modelo de cinta estudiada. La uniformidad de distribución de caudal fue superior al 85% hasta cuando la cinta fue utilizada en 8 ciclos de lechuga, si bien desciende en el caso de 10 usos a un 53%. Por tanto, se podría concluir que la vida útil de una cinta de riego con emisores autocompensantes DripNet PC™ es de ocho usos para las condiciones de cultivo estudiadas (cultivo de lechuga con instalación subterránea de las cintas), si bien, sería conveniente repetir el ensayo con diferentes tratamientos de mantenimiento para sacar unas conclusiones definitivas.

### 1.- Introducción y Objetivos

Las cintas de riego son un material muy utilizado en los sistemas de producción de cultivos hortícolas, tanto en invernadero como al aire libre. Su instalación puede ser subterránea o superficial. En Andalucía se ha generalizado su empleo en cultivos como la fresa y la lechuga. Entre las principales ventajas que presentan, con respecto a los emisores convencionales de riego localizado, se encuentran el menor coste y la mayor ligereza. Esta última característica facilita las labores de instalación y retirada del sistema de riego de las parcelas de cultivo para el acondicionamiento del terreno al inicio de los ciclos productivos.

En instalaciones de riego localizado es posible encontrar una elevada uniformidad de distribución cuando se evalúa la instalación en carga, observándose descensos en la misma conforme aumenta la vida de los emisores (Baeza et al., 2010, 2014). Las investigaciones más recientes sobre la uniformidad de riego en cintas de riego por goteo se centran en el



efecto de la presión de funcionamiento (Safi et al., 2007; Poh et al., 2011; Wang et al., 2012), la longitud de la cinta (Safi et al., 2007; Poh et al., 2011; Wang et al., 2012; Provenzano et al., 2014; Baiamonte et al., 2015), la profundidad de colocación de cinta en riego subterráneo (Patel y Raiput, 2007) y la pendiente del terreno (Wang et al., 2012).

En principio, las cintas de riego, por la baja durabilidad del material están pensadas para una o dos campañas de trabajo, aunque este aspecto está muy influenciado por las labores de mantenimiento realizadas (tratamientos de acidificación, limpieza...) que permiten alargar su vida útil.

Actualmente, las empresas fabricantes ofertan cintas de riego con emisores integrados de las mismas características que los utilizados en los sistemas convencionales de riego localizado, que permitirían una mayor vida útil de las mismas, además de ofrecer la posibilidad de integrar emisores con compensación de caudal que hacen posible trabajar en terrenos con elevada pendiente sin descenso en la uniformidad de distribución de caudal durante el riego. Todos estos nuevos materiales tienen un mayor coste y los usuarios están intentando aumentar el número de usos para mejorar su amortización. Sin embargo, no existen estudios que indiquen la vida útil de este tipo de materiales.

El objetivo de este trabajo fue estudiar el efecto del número de usos sobre la uniformidad de distribución de caudal en una cinta de riego con emisores con compensación de caudal, con el fin de determinar su vida útil.

## 2.- Materiales y Métodos

El experimento se ha desarrollado en el laboratorio de materiales de riego localizado, situado en las instalaciones del Centro IFAPA La Mojonera en La Cañada (Almería). El dispositivo experimental instalado consistió en un banco de pruebas de cintas de riego de 40 m de longitud situado a nivel. Se evaluó el comportamiento de un modelo de cinta de riego con emisores autocompensantes de uso frecuente en el cultivo de lechuga (DripNet PC™ de Netafim). Se estableció un diseño experimental con siete tratamientos y tres repeticiones donde la unidad experimental básica fue un lateral de cinta de riego con 200 salidas. Los tratamientos estudiados fueron los números de ciclos de cultivo de lechuga (1, 2, 3, 5, 6, 8 y 10 usos) y las repeticiones las presiones de trabajo (0.10, 0.15, 0.20 MPa). Las cintas de riego fueron sometidas a pulsos de riego de 15 minutos y se midió el volumen recogido en 28 emisores durante todo el pulso de riego, incluyendo la descarga de la cinta. Se determinó el coeficiente de uniformidad de caudal (CUC) mediante el método propuesto por Merriam & Keller (1978) (Ecuación 1):

$$\text{CUC}=(q_{25\%}/q_m) \times 100 \quad (\text{Ecuación 1})$$

donde:

$q_{25\%}$  = caudal medio del 25% de emisores con menor descarga ( $L h^{-1}$ ).

$q_m$  = caudal medio de todos los emisores evaluados ( $L h^{-1}$ ).

Los valores de CUC fueron clasificados según by Merriam y Keller (1978) (Tabla 1).

**Tabla 1.** Clasificación del coeficiente de uniformidad de caudal (CUC) por Merriam y Keller (1978).

CUC	Clasificación
>95%	Excelente
85%-95%	Bueno
80%-85%	Aceptable
70%-80%	Pobre
<70%	Inaceptable

Antes de realizar las medidas en el banco de pruebas, para cada cinta correspondiente al número de usos estudiados, se determinó el rendimiento hidráulico del emisor mediante una función empírica que relaciona el caudal emitido por el emisor en función de la presión de funcionamiento (curva de gasto del emisor) (Keller y Karmeli, 1974; ASABE, 2005) (Ecuación 2):

$$Q = k P^x \quad (\text{Ecuación 2})$$

donde:

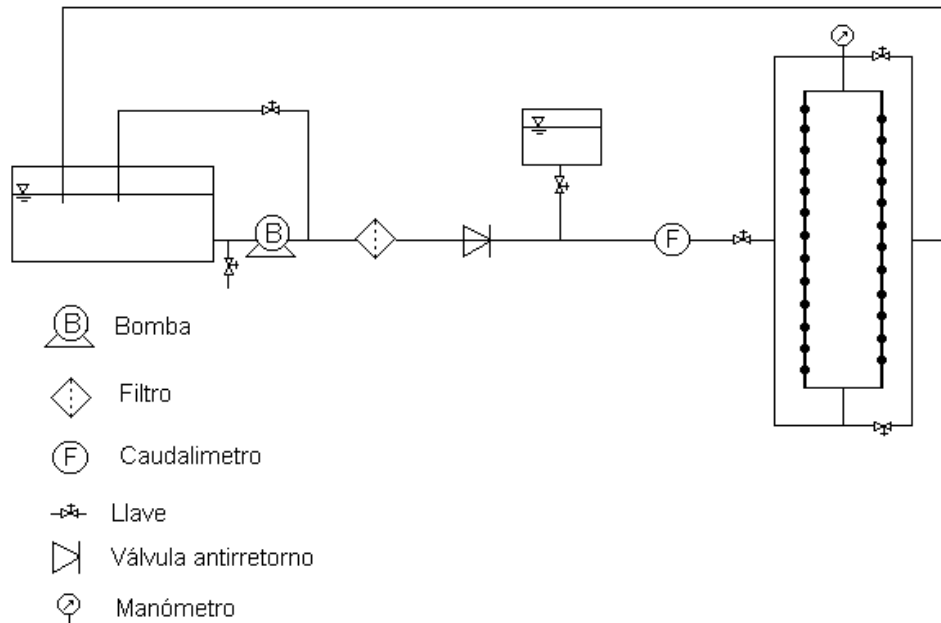
Q es el caudal de descarga del emisor ( $L h^{-1}$ )

k es la constante del emisor

P presión de trabajo (MPa)

x es el exponente de descarga

El banco de ensayo utilizado para la determinación las curvas de gasto de los emisores se diseñó según la norma UNE 68-075-86 (Figura 1), evaluando veinticinco emisores.



**Figura 1.** Esquema del banco de pruebas de emisores de riego localizado.

Los resultados han sido analizados estadísticamente con el software STATGRAPHICS Plus (versión 5.1). Las ecuaciones de gasto del emisor se realizaron mediante una regresión lineal con un ajuste multiplicativo. Se realizó un análisis ANOVA para identificar el efecto de los tratamientos estudiados. Cuando el análisis estadístico reveló diferencias significativas entre tratamientos se aplicó un test de comparación de media (LSD; mínima diferencia significativa) con  $p \leq 0.05$ .

### 3.- Resultados y conclusiones

Los parámetros que definen las curvas de gasto de los emisores en función de las campañas de uso se muestran en la tabla 2. El número de campañas de uso de la cinta de riego no afectó la compensación de caudal, ya que el exponente de descarga de los emisores no se ha visto modificado por el número de usos, en todos los caso se ha situado muy próximo a cero.

**Tabla 2.** Valores of  $k$  y  $x$  para los emisores analizados.

Nº de Campañas de uso	$k$	$x$	Formula de gasto
1	6.55	0.024	$Q(Lh^{-1}) = 6.54869 \cdot P(MPa)^{0.0237929}$
2	6.41	0.012	$Q(Lh^{-1}) = 6.40643 \cdot P(MPa)^{0.011943}$
3	6.60	-0.023	$Q(Lh^{-1}) = 6.60234 \cdot P(MPa)^{-0.0231667}$
5	6.54	-0.002	$Q(Lh^{-1}) = 6.54029 \cdot P(MPa)^{-0.00168198}$
6	6.54	-0.001	$Q(Lh^{-1}) = 6.54002 \cdot P(MPa)^{-0.00138868}$
8	6.45	0.050	$Q(Lh^{-1}) = 6.44573 \cdot P(MPa)^{0.0500578}$
10	6.18	-0.009	$Q(Lh^{-1}) = 6.17649 \cdot P(MPa)^{-0.00925245}$

Sin embargo, a pesar de que el caudal medio ha sido similar en todos los usos, tal y como muestra la escasa modificación observada en la fórmula de gasto (Tabla 2), ha aumentado la variabilidad de los caudales emitidos, viéndose afectada la uniformidad de riego (CUC). Esta variabilidad está asociada a las alteraciones de funcionamiento que se producen en las membranas de los emisores autocompensantes cuando se depositan sedimentos en ellas. Los sedimentos pueden ocasionar tanto obturaciones, como el efecto contrario, incrementos de caudal.

El número de usos ha tenido un efecto estadísticamente significativo en la uniformidad de riego, sin embargo, la presión de trabajo no ha afectado significativamente la uniformidad (Tabla 3).

**Tabla 3.** Nivel de significación de los factores estudiados sobre el coeficiente de uniformidad de caudal (CUC).

Factor	CUC (%)
Número de campañas de uso	*
Presión de trabajo	ns

ns, no significativo.

\*Significativo para  $P < 0.05$ .

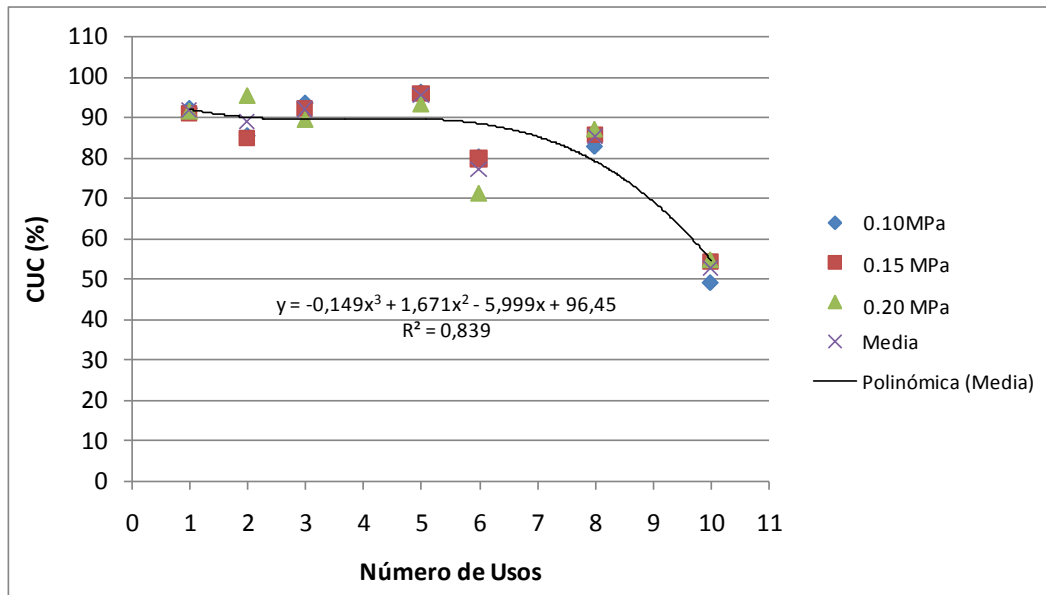
Los CUC medios obtenidos en los emisores, en función del número de campañas de riego, se muestra en la tabla 4. Hasta la quinta campaña de riego, incluida ésta, no se mostraron diferencias significativas en la uniformidad de riego, presentando valores buenos de uniformidad según la clasificación de Merriam y Keller (1978). Sin embargo, en la sexta campaña de uso se registró un descenso de la uniformidad, situándose en valores aceptables, descenso que se acentuó en la décima campaña de uso, registrándose una uniformidad inaceptable (53%).

**Tabla 4.** Efecto del número de campañas de uso en el coeficiente de uniformidad de caudal (CUC).

Nº de campañas de uso	CUC (%)
1	92.48 a
2	89.86 ab
3	92.46 a
5	95.54 a
6	78.17 c
8	86.96 b
10	52.78 d

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias estadísticamente significativa para  $P < 0,05$

Los resultados permitieron establecer una función preliminar que define la relación entre la uniformidad de riego y el número de usos para el modelo de cinta estudiada. Según la curva descrita, la uniformidad de distribución de caudal se sitúa en torno al 90% hasta las cinco campañas de uso, a partir de la cual desciende. Si bien la uniformidad puede ser superior al 85% hasta cuando la cinta es utilizada en 8 ciclos de lechuga, descendiendo drásticamente en el caso de 10 usos a un 53% (Figura 2).



**Figura 2.** Efecto del número de campañas de uso sobre el coeficiente de uniformidad de caudal (CUC).

Se ha observado que el número de fugas de la cinta puede ser elevado dependiendo del manejo de la misma, al igual que el número de goteros totalmente obturados que no está relacionado con el uso de la cinta ni con la presión de trabajo, sino con el manejo, ya que las obturaciones eran ocasionadas principalmente por presencia de arcilla en el emisor. Esta arcilla se introduce principalmente en las operaciones de instalación y desinstalación de la cinta.

Con los resultados obtenidos se podría concluir que la vida útil de una cinta de riego con emisores autocompensantes DripNet PC™ es de ocho usos para las condiciones de cultivo estudiadas (cultivo de lechuga con instalación de cintas enterradas), siempre y cuando se realice unas labores adecuadas de mantenimiento que minimicen las fugas si bien, sería conveniente repetir el ensayo con diferentes tratamientos de mantenimiento para sacar unas conclusiones definitivas.

#### 4.-Agradecimientos

El trabajo ha sido cofinanciado por Fondos Europeos (FSE y FEDER) y la Consejería de Agricultura y Pesca (IFAPA Junta de Andalucía) mediante el Proyecto Transforma Conecta SAR (PP.TRA.TRA201300.10).

#### 5.-Bibliografía

- Al-Amoud, A.I., Mattar, M.A. & Ateia, M.I. (2014). Impact of water temperature and structural parameters on the hydraulic labyrinth-channel emitter performance. *Span. J. Agric. Res.* 12(3): 580-593.
- ASABE (2005). EP-458: Field evaluation of microirrigation systems. ASABE, St. Joseph, USA.
- Baeza Cano, R., Gavilán Zafra, P., Del Castillo Lupiáñez, N., Berenguel, P. & López Segura, J.G. (2010). Programa de evaluación y asesoramiento en instalaciones de riego en



- invernadero con uso de dos fuentes distintas de agua: subterránea y regenerada. XXVIII Congreso Nacional de Riegos. León 15-17 Junio de 2010.
- Baeza, R., Gavilán P. & Contreras, J.I. (2014). Influencia de la pendiente del terreno en la uniformidad de distribución de caudal en cintas de riego localizado. XXXII Congreso Nacional de Riegos. AERYD. Madrid, 10-12 junio de 2014.
- Baiamonte, G., Provenzano, G. & Rallo, G. (2015). Analytical Approach Determining the Optimal Length of Paired Drip Laterals in Uniformly Sloped Fields. *J. Irrig. Drain Eng.* 141(1) 04014042. Online publication date: 1-Jan-2015.
- Gavilán, P., Lozano, D., Ruiz, N. & Molina, F. (2014). El riego de la fresa en el entorno de Doñana. Evapotranspiración, coeficientes de cultivo y eficiencia del riego. XXXII Congreso Nacional de Riegos. AERYD. Madrid, 10-12 junio de 2014.
- Keller, J. & Karmeli, D. (1974). Trickle irrigation design parameters. *Transactions of the ASAE*.
- Lozano, D., Ruiz, N. & Gavilán, P. (2014). Evaluación de la uniformidad de distribución de cintas de riego en condiciones de campo en una producción comercial de fresa en Almonte. XXXII Congreso Nacional de Riegos. AERYD. Madrid, 10-12 junio de 2014.
- Merriam, J.L. & Keller J. (1978). *Farm irrigation system evaluation: a guide for management*. UTAH State University. Logan, Utah, USA.
- Patel, N. & Rajput, T. B. S. (2007). Effect of drip tape placement depth and irrigation level on yield of potato. *Agric. Water Manage.* 88(1):209-223.
- Poh, B.L., Gazula, A., Simonne, E.H., Hochmuth, R.C. & Allgood, M.R. (2011). Use of Reduced Irrigation Operating Pressure in Irrigation Scheduling. II. Effect of Reduced Irrigation System Operating Pressure on Drip-tape Flow Rate, Water Application Uniformity, and Soil Wetting Pattern on a Sandy Soil. *HortTechnology* 21(1); 22-29.
- Provenzano, G., Di Dio, P. & Leone, R. (2014). Assessing a Local Losses Evaluation Procedure for Low-Pressure Lay-Flat Drip Laterals. *J. Irrig. Drain Eng.* 140(6): 04014017.
- Safi, B., Neyshabouri, M.R., Nazemi, A.H., Massiha, S. & Mirlatifi, S. M. (2007). Water application uniformity of a subsurface drip irrigation system at various operating pressures and tape lengths. *Turk J Agric For* 31(5):275-285.
- UNE 68-075-86. (1986). *Material de riego. Emisores. Requisitos generales y métodos de ensayo*. Norma Española.
- Wang, X., Cui, C.N., Shalamu, A. & Shen, X.M. (2012). Field Experiment and Analysis of Irrigation Uniformity of Different Drip Irrigation Tapes. *Water Saving Irrigation* 8: 005.





## OPERACIÓN DE UNA ESTACIÓN DE BOMBEO CON GRUPOS ELECTRÓGENOS

*Ruiz Padín, A.<sup>1</sup>, Medina Martínez, J.M.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería y Ciencias Agrarias, Universidad de León, [aruip@unileon.es](mailto:aruip@unileon.es)

<sup>2</sup> Director Técnico, Comunidad de Regantes del Canal del Pisuerga. Astudillo, Palencia.

### Resumen

Durante los meses de mayo y junio de 2011, la energía eléctrica para el bombeo del sector D (644 ha regadas) de la Zona Regable del Canal del Pisuerga (en adelante, ZR), en Palencia y Burgos, fue suministrada con grupos electrógenos (en adelante GE) debido al robo de los transformadores de la estación. Durante el período de operación con GE se tomaron lecturas de energía consumida por las bombas, energía consumida por los circuitos auxiliares, agua bombeada, horas de funcionamiento y volúmenes de repostaje de cada uno de los GE, y superficies, volúmenes suministrados y cultivos para los hidrantes operados durante el período. Con estos datos, se determinaron los consumos totales, consumos específicos y rendimientos de los grupos; consumos por m<sup>3</sup> bombeado y por ha regada; costes fijos y variables de operación con GE; y costes fijos y variables de operación con energía de la red. El principal problema durante la operación fue la limitada autonomía de los equipos. El coste final del agua de riego, para el período analizado, fue de 0,165 € m<sup>-3</sup>, frente a los 0,026 € m<sup>-3</sup> con suministro de la red eléctrica para esa campaña.

### Abstract

During the months of May and June of 2011, electricity for pumping sector D (644 irrigated ha) of the Pisuerga Channel Irrigation Area (hereinafter ZR), in Palencia and Burgos, Spain, was supplied with generators (hereinafter GE) due to theft of the pumping station transformers. During the operation with GE, readings of energy consumed by pumps, energy consumed by the auxiliary circuits, pumped water, hours of operation and refueling volumes for each GE, and surfaces, volumes supplied and crops for hydrants operated, were taken during the period.

With these data, total consumption, specific consumption and GE performance were determined; consumption per pumped cubic meter and per watered hectare; fixed and variable costs of operation with GE; and fixed and variable costs of operation with utility power. The main problem during the operation was limited autonomy of GE. The final cost of irrigation water for the analyzed period was 0.165 € m<sup>-3</sup>, compared with 0.026 € m<sup>-3</sup> with utility power for that campaign.

### 1- Introducción y objetivos

La ZR comprende la superficie dominada por el canal del Pisuerga en tierras de los términos de Astudillo, Villalaco, Villodre, Melgar de Yuso, Itero de la Vega, Lantadilla, Zarzosa, Ventosa y Herrera del Pisuerga, en la provincia de Palencia; y San Llorente de la Vega y Melgar de Fernamental, en la provincia de Burgos. El canal domina una superficie de 12.000 ha, de las cuales se riegan 9.530. La zona regable está en proceso de modernización, habiéndose concluido la mejora de 6.493 ha, que se encuentran en explotación desde el año 2009.

En abril de 2011, iniciada la campaña de riegos, se produjo el robo de los devanados de cobre de los transformadores de la estación de bombeo correspondiente al sector D de la ZR, dejando esta inútil para el servicio. El plazo de entrega de los nuevos transformadores se demoraba hasta principios de julio, por lo que hubo de alistarse la estación para su funcionamiento mediante GE para no interrumpir la campaña.

El objetivo del presente trabajo es describir la solución adoptada y su problemática asociada, cuantificar los factores implicados en el coste del riego con energía de GE en una estación modernizada, fijos y variables, y determinar el sobrecoste sobre la energía de red.

## 2- Materiales y métodos

El sector D tiene una superficie de 1.183 ha, de las que en la campaña 2011 se regaron 644, cultivadas principalmente de cereal de invierno y remolacha (Tabla 1).

**Tabla 1. Distribución de cultivos**

C. inv.	Rem.	Alfalfa	Girasol	C. biom.	Maíz	Otras	Total
328,5	118,0	68,0	63,8	25,8	23,1	16,2	<b>643,5</b>
51,05%	18,34%	10,57%	9,92%	4,01%	3,59%	2,52%	<b>100,00%</b>

C. inv.: Cereales de invierno; Rem.: Remolacha; C. biom.: Cultivo para biomasa. Superficies en ha.

La campaña de riegos comenzó el 1/04/11. El período de riego con GE se extendió desde el 12/05/11 hasta el 09/07/11, con una duración de 58 días, prosiguiendo la campaña hasta el 30/09/11 con energía de la red tras la instalación de los nuevos transformadores.

La estación de bombeo del sector D consta de 4 bombas verticales principales de 350 kW y 2 bombas verticales auxiliares de 200 kW, operables mediante variador de frecuencia. Las instalaciones necesarias para adaptar el funcionamiento de la estación al suministro mediante GE consistieron en:

- Suministro y puesta en marcha de dos GE de 800 kVA cada uno para suministro de energía a las bombas, en régimen de alquiler.
- Suministro y puesta en marcha de un GE de 30 kVA para suministro de energía a los circuitos auxiliares, en régimen de alquiler.
- Suministro y puesta en marcha de un transformador de 400 kVA, relación 400:690, en régimen de alquiler.
- Tendido provisional de una línea desde los grupos principales hasta el embarrado general de potencia de las bombas.
- Tendido provisional de una línea desde el grupo auxiliar hasta el embarrado de circuitos auxiliares.
- Conexión de los equipos y cuadros de protección respectivos.

El alquiler de los equipos se facturó por días, del 4/05/11 al 9/07/11, totalizando 65 días. Dado que en 2011 solo se regaba aproximadamente la mitad del sector, y de ésta más de la mitad correspondía a cereales de invierno, durante la mayor parte del tiempo solo se



operó una de las bombas principales. La potencia de grupos instalada fue claramente excesiva (del orden del cuádruple de la requerida). Con un solo grupo de 400 kVA se hubiera satisfecho la demanda punta con un resguardo aceptable. Cabe reseñar que la decisión de alquilar dos grupos se tomó para garantizar la disponibilidad de reserva en caso de fallo, y su tamaño por razones de autonomía, no por potencia.

Con el fin de permitir un análisis detallado de la operación de la estación en el período, se recogieron con periodicidad de 12 horas lecturas de los siguientes parámetros:

- Lecturas de energía consumida por las bombas, mediante analizador de redes aguas arriba del embarrado de potencia.

- Lecturas de energía consumida por los circuitos auxiliares (iluminación de la estación, válvulas motorizadas, alimentación de autómatas, alarmas, etc.), mediante analizador de redes a la salida del grupo auxiliar.

- Lecturas de agua bombeada, mediante el caudalímetro electromagnético del colector de impulsión.

- Horas de funcionamiento de cada uno de los grupos, en cada uno de sus cuadros de mando.

- Volumen de repostaje de cada uno de los grupos (en el momento del repostaje).

- Superficies, volúmenes suministrados y cultivos para los hidrantes operados durante el período.

Se recogieron también todos los datos contables necesarios para el análisis de costes, principalmente alquileres de equipos, portes, tendido de líneas provisionales, importe de los repostajes y facturas eléctricas durante el total de la campaña.

Con los datos citados, se determinaron los consumos totales, consumos específicos y rendimientos de los grupos; consumos por m<sup>3</sup> bombeado y por ha regada; costes fijos y variables de operación con GE; y costes fijos y variables de operación con energía de la red.

### **3- Resultados y discusión**

Los totales de las lecturas realizadas figuran en el cuadro que sigue.

#### Lecturas analizadores de red

Servicios auxiliares	9.178,07	kW·h
Potencia	235.315,56	kW h

#### Lectura caudalimetro

771.555,00 m<sup>3</sup>

#### Lecturas horas de funcionamiento

Grupo izquierdo	349,00	h
Grupo derecho	425,00	h
Grupo auxiliar	1.392,00	h

#### Lecturas repostaje

Grupo izquierdo	39.494,00	l
Grupo derecho	41.052,00	l
Grupo auxiliar	4.397,00	l

Durante el período de operación con GE el caudal continuo medio efectivo bombeado fue de 0,277 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, que supone un caudal medio de 0,154 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> durante la operación con GE para el índice de funcionamiento del 55,6% de la estación. La dotación media correspondiente fue de 0,24 l s<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup>, que resulta baja debido a la elevada superficie de cereales de invierno.

Los parámetros de funcionamiento calculados figuran en el cuadro que sigue.

#### Parámetros grupos potencia

Consumo horario grupo izquierdo	113,16	l h <sup>-1</sup>
Consumo horario grupo derecho	96,59	l h <sup>-1</sup>
Consumo total de combustible	80.546	l
Consumo de gasoil por UEE*	0,342	l kW <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>
Consumo específico*	284,8	g kW <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>
Consumo de energía por UVB*	0,305	kW h m <sup>-3</sup>
Consumo de gasoil por UVB*	0,104	l m <sup>-3</sup>
Potencia activa media demandada*	304,03	kW
Rendimiento total motor-generator*	29,3	%

#### Parámetros grupo auxiliar

Consumo horario	3,16	l h <sup>-1</sup>
Consumo de gasoil por UEE	0,479	l kW <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>
Consumo específico	398,6	g kW <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup>
Repercusión de gasoil por UVB	0,006	l m <sup>-3</sup>
Potencia activa media demandada	19,63	kW
Rendimiento total motor-generator	20,96	%

\* Valor medio para los dos grupos

UEE: unidad de energía eléctrica, UVB: unidad de volumen bombeada

Para el cálculo del consumo específico se ha tomado para el gasoil una densidad a 20 °C de 832 kg m<sup>-3</sup> y un poder calorífico inferior de 43.100 kJ kg<sup>-1</sup>.

Los grupos de potencia funcionaron de forma alterna, nunca simultáneamente, permitiendo alargar el intervalo entre repostajes. De todas formas, debido a la imposibilidad de disponer un depósito provisional de alta capacidad por razones administrativas hizo que fuera necesario repostar desde camión cisterna diariamente, alternando los grupos de madrugada. La potencia media demandada indica que el factor de carga medio del grupo en funcionamiento fue del 41,3% (para un  $\cos \phi$  de 0,92), lo que confirma el exceso de capacidad de generación anteriormente reseñado.

El consumo específico de los grupos de potencia es aceptable, aunque superior al de grupos de alta eficiencia (alrededor de  $230 \text{ g kW}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ). Debe tenerse en cuenta que los grupos funcionaron la mayor parte del tiempo por debajo de media carga, lejos de la zona de mayor eficiencia. El consumo específico del grupo auxiliar es elevado, con un rendimiento casi diez puntos inferior al de los grupos de potencia. Este bajo rendimiento es explicable por su funcionamiento continuo, mucho tiempo a carga casi nula.

El consumo total de gasoil por UVB, incluyendo la repercusión del funcionamiento de grupos auxiliares, fue de  $0,110 \text{ l m}^{-3}$ .

En el cuadro que sigue figura el detalle desglosado de los costes fijos y variables de operación con GE, así como los costes unitarios. Todos los costes corresponden a precios de facturación sin IVA.

<b>A. Costes fijos</b>	<b>62.800,52 €</b>	<b>49,30% s/C</b>
<b>A.1. Alquileres y portes (65 días)</b>	<b>40.222,52 €</b>	<b>64,05% s/A</b>
2 grupos principales de 800 kVA, a $269,27 \text{ € d}^{-1} \text{ c/u}$	35.004,67 €	87,03% s/A.1
1 grupo auxiliar de 30 kVA, a $9,95 \text{ € d}^{-1}$	646,60 €	1,61% s/A.1
1 transformador de 400 kVA, R400:690, a $40,25 \text{ € d}^{-1}$	2.616,25 €	6,50% s/A.1
Portes de entrega y recogida	1.955,00 €	4,86% s/A.1
<b>A.2. Adaptación para funcionamiento con GE</b>	<b>22.578,00 €</b>	<b>35,95% s/A</b>
Líneas provisionales, aparellaje, protección	22.578,00 €	
<b>B. Coste variable</b>	<b>64.584,76 €</b>	<b>50,70% s/C</b>
Gasoil ( $84.943 \text{ l}$ a $0,76 \text{ € l}^{-1}$ )	64.584,76 €	
<b>C. Coste total</b>	<b>127.385,28 €</b>	
<b>D. Volumen total bombeado (<math>\text{m}^3</math>)</b>	<b>771.555</b>	
<b>E. Coste unitario total (<math>\text{€ m}^{-3}</math>)</b>	<b>0,165</b>	
Coste unitario fijo ( $\text{€ m}^{-3}$ )	0,081	49,30% s/E
Coste unitario variable ( $\text{€ m}^{-3}$ )	0,084	50,70% s/E

Sobre los costes indicados caben las las siguientes observaciones:

- El coste final por m<sup>3</sup> bombeado depende de la altura de bombeo, por lo que debe ser empleado con esta reserva.

- La mitad de este coste se debe a costes fijos. De haber ajustado la potencia instalada a 400 kVA, como se propone más arriba, el coste unitario fijo se habría reducido a 0,047 € m<sup>-3</sup>, y el coste unitario total a 0,131 € m<sup>-3</sup>. Es por tanto importante estimar con la mayor exactitud posible las necesidades de potencia.

- El coste fijo correspondiente a la adaptación de la instalación es irrecuperable, aunque el material se ha almacenado en previsión de posibles futuras incidencias similares y podría ser empleado en cualquiera de las estaciones de la ZR.

En comparación a los valores indicados, el coste variable del bombeo con energía de la red, calculado a partir de las facturas de suministro eléctrico del resto de la campaña fue de 0,0265 € m<sup>-3</sup> en período P5 y 0,0196 € m<sup>-3</sup> en período P6. Esto supone que el coste variable de bombeo con GE resulta entre 3,2 y 4,3 veces superior al coste con energía de la red. Incluyendo los costes fijos, el coste total del bombeo con energía de la red fue de 0,0307 € m<sup>-3</sup> en período P5 y 0,0238 € m<sup>-3</sup> en período P6, siendo el coste total con GE entre 5,3 y 7,2 superior al coste con energía de la red.

Un análisis de las cifras anteriores permite afirmar que para una campaña completa, el coste variable del agua en caso de operar el bombeo con GE, aunque alto (en torno a los 380 € ha<sup>-1</sup>), parece perfectamente asumible. No ocurre lo mismo con el coste total, que supondría en torno a los 740 € ha<sup>-1</sup>. Dado que la probabilidad de que incidentes similares al acaecido en 2011 en la ZR parece estar aumentando, tal vez resultaría conveniente disponer de GE compartidos (p.ej. cada 100.000 ha), en régimen de propiedad o de reserva preferente con alquiler cubierto mediante seguro, u otra fórmula similar, y material de adaptación reutilizable, lo que permitiría que el coste fijo fuera casi nulo.

#### 4- Conclusiones

Las principales conclusiones obtenidas del presente trabajo son:

- Es posible la operación de una estación de bombeo modernizada mediante grupos electrógenos debido a circunstancias sobrevenidas, y existe disponibilidad de potencia en el mercado de alquiler para ello.

- El plazo necesario para alistar la estación para comenzar el riego con energía de los grupos puede estimarse entre 5 y 7 días.

- La operación durante el período analizado se produjo sin incidencias debidas al tipo de suministro eléctrico.

- El principal problema durante la operación fue la limitación de autonomía de los equipos (aprox. 15 horas), debiéndose rotar los grupos a horas intempestivas.

- El coste final del agua de riego, para el período analizado, fue de 0,165 €/m<sup>3</sup>, frente a los 0,026 €/m<sup>3</sup> con suministro de la red eléctrica para esa campaña.





# DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL FLUJO DE TRABAJO EN LA ADQUISICIÓN Y TRATAMIENTO DE IMÁGENES DE ALTA RESOLUCIÓN CON VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS

*Ribeiro Gomes, K. <sup>1</sup>, Hernandez Lopez, D. <sup>2</sup>, Ballesteros Gonzalez, R. <sup>3</sup>, Moreno Hidalgo, M. A. <sup>4</sup>.*

<sup>1</sup> Ingeniera Agrónoma, Becaria Erasmus-Mundus, Centro Regional de Estudios del Agua (CREA), Ctra. De Las Peñas km. 3,2, 02071 Albacete, Krishna.RibeiroGomes@uclm.es

<sup>2</sup> Profesor Titular, Instituto de Desarrollo Regional (IDR), Campus Universitario s/n, 02071 Albacete, David.Hernandez@uclm.es

<sup>3</sup> Personal Investigador, Centro Regional de Estudios del Agua (CREA), Ctra. De Las Peñas km. 3,2, 02071 Albacete, Rocío.Ballesteros@uclm.es

<sup>4</sup> Profesor Titular, Centro Regional de Estudios del Agua (CREA), Ctra. De Las Peñas km. 3,2, 02071 Albacete, MiguelAngel.Moreno@uclm.es

## Resumen

La captura de imágenes aéreas de alta resolución para el monitoreo y control de los cultivos a través de vehículos aéreos no tripulados (VANTs) es una herramienta de utilización creciente y eficaz. Una de las limitaciones de esta técnica es que para obtener el producto final generado a partir de las imágenes (ortoimagen y/o modelo digital del terreno), hay que seguir una serie de pasos que demandan esfuerzo y tiempo, principalmente la selección de imágenes no borrosas y la localización de puntos de control en el terreno para georreferenciar y escalar los productos geomáticos obtenidos. Así, el objetivo de este trabajo es desarrollar una metodología que reduzca el tiempo de trabajo de la adquisición y tratamiento de imágenes obtenidas a partir de VANTs, mediante la automatización de la detección de imágenes borrosas. Los productos geomáticos obtenidos mediante la metodología propuesta muestran un elevado error en posicionamiento absoluto (aproximadamente 30 metros), pero con un posicionamiento relativo muy bueno, con errores en escala en torno a 2000 ppm. Los mayores errores en la rotación del modelo están en torno a los 8 grados.

## 1- Introducción y Objetivos

Las nuevas tecnologías aplicadas a la agricultura ayudan al objetivo del incremento de la productividad y la sostenibilidad de la agricultura. Con el gran crecimiento de la población, diversas tecnologías tuvieron que ser desarrolladas y mejoradas para elevar la productividad de los cultivos para satisfacer las necesidades. Así, el uso de vehículos aéreos no tripulados (VANTs) fue un paso importante y necesario para el crecimiento de la agricultura, pues genera imágenes aéreas con una alta resolución espacial y temporal, cuando su uso es comparado al uso de imágenes de satélites. A partir de las imágenes capturadas por los VANTs es posible evaluar el desarrollo de un cultivo y determinar cuáles son las parcelas más productivas de una finca (Ballesteros et al. 2014 a, b, Linhares et al., 2014). Se puede también detectar las áreas afectadas por plagas agrícolas y las áreas que estén se desarrollando bajo deficiencia nutricional (Jorge y Inamasu, 2014). Con una cámara

térmica de alta resolución acoplada en el VANT ya es posible también fornecer recomendaciones de la necesidad del riego de un cultivo a nivel de hacienda a partir de los datos de la respuesta de la cultura evaluados en las imágenes, eso porque las plantas sometidas a diferentes tratamientos de riego presentan una variación en la reflectancia fotoquímica que es detectable a través de imágenes captadas de cámaras térmicas de alta resolución (Gonzalez-Dugo et al. 2014, Zarco-Tejada et al. 2013).

Para obtener el producto geomático a partir de imágenes de VANTs, como son la ortoimagen georreferenciada y el modelo digital del terreno (MDT) se utilizan diversos programas informáticos de fotogrametría, como pueden ser Photoscan (Agisoft, St. Petersburg, Russia), y Pix4D (Pix4D, Lausanne, Switzerland) entre otros. En estos programas hay que seleccionar las mejores imágenes y detectar manualmente los puntos de control localizados en el terreno, siendo estos dos pasos costosos en tiempo y los únicos que requieren acción de las personas, siendo el resto automáticos. En este trabajo se plantea una metodología que relaja el método convencional de georreferenciación con el objetivo de alcanzar una precisión acorde con las exigencias propias de ciertas aplicaciones agronómicas incrementando el rendimiento en base a la eliminación de la medida de puntos de apoyo, lo que reduce los trabajos de campo y de gabinete, además de evitar acceder a la parcela en ciertos estados fenológicos del cultivo que podrían afectar al mismo.

Muchos autores están en acuerdo con la georreferenciación aproximada de imágenes o vídeos capturados a partir de VANTs. Laliberte et al. 2008, desarrolló una metodología, implementada en un software de nombre PeSync, para realizar la ortorectificación de imágenes obtenidas con un VANT, obteniendo un error medio cuadrático (RMSE) de 48 cm para un tamaño de pixel en el terreno (GSD) de 5 cm. La principal desventaja de este procedimiento es que es solamente para la aplicación en planimetría (errores en X e Y, pero no en Z) y con mosaico. Eugster y Nebiker (2007), desarrollaron una metodología para la secuencia de geo-registro en vídeo, con la necesidad de un uso adicional de la información geométrica y semántica del entorno virtual del globo. Gómez-Candón et al. 2011, desarrollaron métodos para georreferenciar imágenes aéreas a través de la localización de dianas específicas, que no elimina la problemática de la instalación de dianas de control en tierra. Xiang y Tian (2011), desarrollaron una metodología de georreferenciación automática de imágenes aéreas a través de una plataforma de adquisición de datos de imágenes de VANT, que no requiere el uso de puntos de control en tierra. Ellos georreferenciaron imágenes de manera separada, obteniendo un RMSE de 90 cm, y técnicas de mosaicos aplicados, obteniendo errores de 56 cm. Una vez más no analizaron el error 3D.

Así, el objetivo de este trabajo es desarrollar una metodología que reduzca el tiempo de trabajo de la adquisición y tratamiento de imágenes obtenidas a partir de vehículos aéreos no tripulados (VANTs), mediante la automatización de la selección de las imágenes óptimas en base a la eliminación de imágenes detectadas como borrosas.

## 2- Materiales y Métodos

Los pasos normalmente realizados para la generación de ortoimágenes y MDT georreferenciados con VANTs son: 1) planificación del vuelo fotogramétrico, 2) marcado del área de vuelo con puntos de control en el terreno, 3) medida de los puntos de control en campo con GPS-RTK, 4) ejecución del vuelo, 5) detección manual de imágenes borrosas y eliminación, 6) proceso fotogramétrico mediante software especializado (Ballesteros et al. 2014a).

El paso 1 es importante pues con la planificación del vuelo es posible determinar la ruta del VANT y programar la cantidad de imágenes que deben ser obtenidas durante el vuelo. El paso 2 es el proceso de poner manualmente los puntos de control dispuestos en el área que se desea evaluar y el 3 es la utilización de un GPS para medir todos los puntos

para obtener las coordenadas, estos dos pasos son los que demandan más tiempo en el campo. El paso 4 es el último del campo que es la ejecución del vuelo, donde son obtenidas las imágenes y son almacenados los archivos con los datos del vuelo. El paso 5 requiere una buena precisión del observador para seleccionar las imágenes con mejor calidad y que no estén muy borrosas, para generar buenos productos geomáticos. El paso 6 consta de utilizar las imágenes generadas y los datos de vuelo para producir los productos geomáticos, para eso se utilizan programas como UASMaster, Pix4D, o PhotoScan.

En este trabajo se trata de obtener una metodología que permita eliminar los pasos 2, 3 y reducir el tiempo manual de procesado del 5 y 6, mediante la georreferenciación aproximada de las imágenes capturadas mediante el sistema de navegación del VANT y el desarrollo de herramientas de visión computacional para la detección y eliminación automática de imágenes borrosas que pudieran perturbar el resultado final.

## 2.1. VANT y cámara utilizada

Para calibrar y validar la metodología propuesta se realizaron numerosos vuelos en distintos cultivos en los cuales se utilizó un VANT del tipo microdrones md4-200. En este trabajo sólo se mostrará los resultados obtenidos con un vuelo, al ser el resto semejantes. Este equipo permite para cada vuelo, almacenar los datos de navegación del UAV: latitud, longitud, altitud barométrica, yaw, pitch y roll, en el momento de cada captura de la imagen.

El VANT montaba una cámara digital de modelo Canon Ixus HS115. Las principales características de la cámara son: sensor 1/2.3" del tipo CCD, con 12.1 millones de píxeles efectivos y tamaño de pixel de 0.0015 mm. El tamaño del imagen es de 4000 x 3000 (columnas y filas), las lentes son de 28-112 mm, la focal es de 2.8-5.9 y la sensibilidad ISO varía de ISO 100-ISO 3200.

Se llevó a cabo una calibración precisa de la cámara para lo cual cerca de 40 dianas fueron dispuestas en diferentes posiciones y profundidades sobre una fachada. Con auxilio de un Scanner 3D de alta precisión (5 mm a 50 m) fue hecha la localización precisa de cada diana, fueron también sacadas imágenes de las dianas en dos distancias. Las imágenes obtenidas y las coordenadas del scanner fueron procesadas en el programa Agisoft PhotoScan, y se generó la calibración de la cámara, la cual se utilizó para conseguir unos productos geomáticos de alta precisión.

Los parámetros de calibración de la cámara se pueden observar en la **Tabla 1**.

**Tabla 1.** Parámetros de calibración de la cámara Canon Ixus HS115 (zoom x1 y zoom x3)

	Zoom x1 (Theoretical 4.9 mm)	Zoom x3 (Theoretical 7.2 mm)
fx (pixel)	3287.14	4336.77
fy (pixel)	3287.75	4337.39
Cx	1983.88	1979.79
Cy	1466.31	1459.22
skew	0.109	-0.115
k1	-0.047043568	-0.119807847

## 2.2. Detección automática de imágenes borrosas.

Para la detección automática de imágenes borrosas se ha desarrollado un programa informático en entorno MatLab®. Este programa está basado en tratamiento de imágenes. Así se aplica a las imágenes una transformada rápida de Fourier, que es la representación matemática de la imagen en el dominio de la frecuencia. Aquellas que presenten frecuencias

altas, son imágenes más borrosas. La transformada de Fourier se encuentra descrita en la siguiente ecuación,

$$X(k) = \sum_{j=1}^N x(j) \omega_N^{(j-1)(k-1)}$$

Donde

$$\omega_N = e^{(-2\pi i)/N}$$

Después, las componentes de frecuencia nula son centradas al centro del espectro de frecuencias ( $X_{cen}$ ), esa función es importante para visualizar los resultados de la transformada de Fourier. En seguida los datos son transformados con una función que ensalza los resultados de amplitud y asimetría de las frecuencias, en este caso:

$$Variable = 20 \times \log_{10}(0.001 + X_{cen})$$

Donde valor  $X_{cen}$  es el valor centrado en el centro del espectro.

Para determinar mediante un valor la proporción de altas frecuencias en una imagen, se calculó la asimetría del resultado de la función ensalzada de frecuencias. En esta función los datos son medidos alrededor de la media simple pudiendo establecer un límite en asimetría que determina si una imagen es borrosa o no, para cada focal y altura de vuelo. La asimetría de la distribución normal (o cualquier distribución perfectamente simétrica) es cero. De acuerdo con el tiempo utilizado para sacar las fotos a través del dron y de acuerdo con la cantidad de paradas que el dron ha hecho para sacar las fotos en la programación de Matlab fue posible que estas funciones fuesen aplicadas a un set de imágenes para que entre tres imágenes fuera seleccionada la con el menor valor de asimetría.

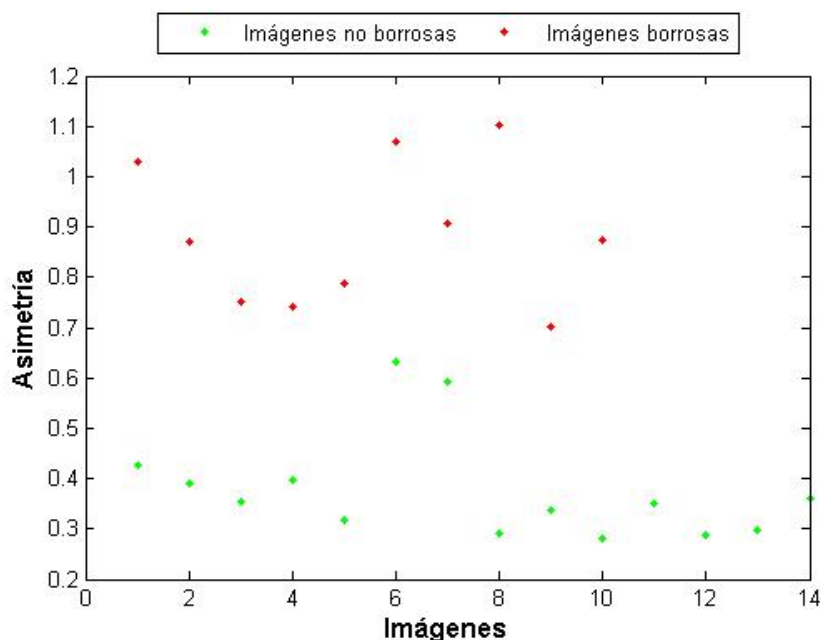
### 2.3. Comparación de productos geomáticos precisos y aproximados.

En estos vuelos se desarrolló la metodología completa, siguiendo todos los pasos normalmente utilizados en el proceso de georreferenciación, para la generación de ortoimágenes y modelos digitales del terreno con precisión centimétrica. Sobre estos vuelos se aplicó la metodología descrita, sin los pasos 2 y 3, y se comparó los errores de posicionamiento y escala mediante la aplicación de una relación de Helmert, que permite la comparación en 3D de los modelos obtenidos. En la metodología completa las imágenes seleccionadas y los archivos generados con el GPS fueron introducidos en programas de tratamiento de imágenes para generación de los productos geomáticos: PhotoScan y Pix4D. En la metodología descrita las mismas imágenes fueron insertadas en los programas pero con las coordenadas capturadas por el VANT. En los dos procedimientos las imágenes fueron alineadas, georreferenciadas con las coordenadas del vuelo, para aquellas sin los pasos 1 y 2, y las coordenadas del GPS, para aquellas que pasaron por todos los pasos, todas en las coordenadas ETRS89 UTM30. Fueron construidas la nube densa, la malla y la textura de las imágenes. Con el proyecto hecho fueron generados el MDT y la ortoimagen. Esos productos geomáticos generados fueron introducidos en el programa Qgis donde fueron capturadas las coordenadas de los puntos comunes (dianas) para posterior comparación de los resultados para determinar cuáles fueron las diferencias entre las dos metodologías utilizadas.

### 3- Resultados y Discusión

#### 3.1. Detección de imágenes borrosas

En la **Figura 1** se muestra el valor de asimetría calculado para todas las imágenes, estableciendo un límite del valor de asimetría de 0,7. Este límite fue establecido para esta cámara para la altura de vuelo y focal concreta en base a inspección visual. Así, se puede calibrar este límite para cada configuración de cámara y condiciones de vuelo.



**Figura 1.** Valores de asimetría para determinar las imágenes borrosas

La **Figura 2** muestra una comparación entre una imagen seleccionada como no borrosa y otra seleccionada como borrosa, validando el algoritmo de detección.



**Figura 2.** Ejemplo de imágenes seleccionadas borrosas y no borrosas.

La detección automática de imágenes borrosas permite reducir considerablemente los tiempos de preparación de la información para el procesamiento fotogramétrico. Además, permite determinar en campo la calidad de las imágenes obtenidas pudiendo tomar la decisión en el momento sobre la idoneidad de repetir el vuelo ejecutado, con el considerable ahorro de costes en el trabajo de campo.



### 3.2. Determinación del error de los productos geomáticos con georreferenciación aproximada

Una vez obtenidos los productos geomáticos (ortoimagen y MDT) a partir de orientaciones externas de la cámara aproximadas mediante PhotoScan y Pix4D y obtenidas las coordenadas de los puntos de control del terreno con QGIS a partir de estos productos, se comparó mediante un Helmert 3D las coordenadas aproximadas y las medidas con GPS-RTK. En la **Tabla 2** se muestran los resultados de traslación, rotación y factor de escala de los productos geomáticos aproximados con respecto al modelo preciso.

**Tabla 1.** Traslación, rotación y factor de escala de los productos geomáticos aproximados con respecto al modelo preciso

	Photoscan	Pix4D
Traslación en X	-22.07	-21.85
Traslación en Y	-36.76	-35.44
Traslación en Z	40.43	37.27
Rotación en X	16.09	15.04
Rotación en Y	-10.57	-9.90
Rotación en Z	0.68	0.54
Factor de escala	0.993	0.998

Se puede observar que ambos programas informáticos devuelven errores semejantes. Además, se deduce de los resultados obtenidos que, aunque ambos programas permiten definir la orientación externa de las imágenes, realmente no las están utilizando para generar el modelo. Esto redundará en una rotación en los tres ejes elevada. El factor de escala es muy adecuado, lo que muestra que los productos geomáticos están resueltos de forma adecuada en relativo, pero que se ven desplazados y rotados, al no considerar de forma adecuada la orientación externa de las imágenes.

Por lo tanto, al obtener un factor de escala muy preciso, se puede obtener información agronómica de forma precisa, tales como el grado de cobertura, volúmenes ocupados por la vegetación y por lo tanto biomasa aérea, entre otros parámetros. El principal problema encontrado es que si se hacen varios vuelos en fechas distintas de la misma zona, éstos no se pueden fácilmente integrar al no ser precisa la georreferenciación de los modelos.

Así, se hace necesario establecer una metodología que permita trasladar y rotar el modelo obtenido, sobre lo que se está trabajando determinando con productos geomáticos existentes, tales como los procedentes del PNOA (nube de puntos disponibles actualmente), la correcta orientación del modelo y poder transformarlo.

El tiempo de trabajo en campo con la eliminación de los pasos 2 y 3 fue disminuido considerablemente. De la misma forma la selección automática de las imágenes proporcionó un gran ahorro de tiempo además de la selección de las mejores imágenes que al ojo humano no es posible detectar precisamente. Los productos geomáticos obtenidos mediante la metodología propuesta muestran un elevado error en posicionamiento absoluto (aproximadamente 30 metros), pero con un posicionamiento relativo muy bueno, con errores en escala en torno a 2000 ppm.

## 4- Conclusiones

Se ha desarrollado una metodología que permite reducir los tiempos de trabajo de campo y posterior proceso en un 60%, con el consecuente ahorro económico.

Aunque el posicionamiento absoluto no es adecuado, propio de los sistemas de navegación con GPS, al obtener un error relativo dentro del modelo muy bajo, se obtienen productos de utilidad para la práctica agronómica.





Se continúa trabajando en la línea de georreferenciar de forma absoluta el producto geomático obtenido con esta metodología, lo que permitirá evaluar la evolución de los cultivos en vuelos sucesivos.

## 5- Bibliografía

- Ballesteros, R.; Ortega, J.F.; Hernández, D.; Moreno, M.A. (2014). Applications of georeferenced high-resolution images obtained with unmanned aerial vehicles. Part I: Description of image acquisition and processing. *Precision Agriculture*, 15:579–592
- Ballesteros, R.; Ortega, J.F.; Hernández, D.; Moreno, M.A. (2014). Applications of georeferenced high-resolution images obtained with unmanned aerial vehicles. Part II: application to maize and onion crops of a semi-arid region in Spain. *Precision Agriculture*, 15:593–614
- Eugster y Nebiker (2007). Geo-registration of video sequences captured from mini UAVs – Approaches and accuracy assessment. 5th International Symposium on Mobile Mapping Technology. Padua, Italia.
- Gómez-Candón D. López-Granados F. Caballero-Novella J. J. Gómez-Casero M. Jurado-Expósito M. García-Torres L. (2011). Geo-referencing remote images for precision agriculture using artificial terrestrial targets. *Precision Agriculture*, 12:876–891
- González-Dugo, V.; Goldhamer, D.; Zarco-Tejada, P.J.; Fereres, E. (2014). Improving the precision of irrigation in a pistachio farm using an unmanned airborne thermal system. *Irrig Sci* 33: 43-52
- Jorge, L. A. de C.; Inamasu, R. Y. (2014). Uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) em agricultura de precisão. In: BERNARDI, A. C. de C.; NAIME, J. de M.; RESENDE, A. V. de; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (Ed.). *Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar*. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 109-134. <<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1003485>>
- LaLiberte A.S. y Rango A. (2011). Image Processing and Classification Procedures for Analysis of Sub-decimeter Imagery Acquired with an Unmanned Aircraft over Arid Rangelands. *GIScience & Remote Sensing*, 1:4-23.
- Linhares, M.M.A.; Amaral, B.A.S.; Costa, A.P.; Rocha, N.C.C.; Cândido, L.G. (2014). Vant's aplicados ao monitoramento da evolução vegetativa de culturas agrícolas. Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão, 14-17 de Setembro de 2014, São Pedro, São Paulo, <<http://www.sbea.org.br/conbap/2014/trabalhos/R0062-2.PDF>>
- Xiang H. y Tian L. (2011). Method for automatic georeferencing aerial remote sensing (RS) images from an unmanned aerial vehicle (UAV) platform. *Biosystems Engineering*, 108:104-113
- Zarco-Tejada, P.J.; González-Dugo, V.; Williams, L.E.; Suárez, L.; Berni, J.A.J.; Goldhamer, D.; Fereres, E. (2013). A PRI-based water stress index combining structural and chlorophyll effects: Assessment using diurnal narrow-band airborne imagery and the CWSI thermal index. *Remote Sensing of Environment*, 138: 38-50



## INTEGRACIÓN DE MODELOS FOTOVOLTAICO E HIDRÁULICO PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DE BOMBEO SOLARES DE INYECCIÓN DIRECTA A SISTEMAS DE RIEGO

*Cervera Gascó, J.<sup>1</sup>, Del Castillo Sánchez Cañamares, A.<sup>2</sup>, Montero Martínez, J.<sup>3</sup>, Tarjuelo Martín-Benito, J.M.<sup>4</sup>, Moreno Hidalgo, M.A.<sup>5</sup>*

<sup>1</sup> Ingeniero Agrónomo, Contratado Predoctoral; Centro Regional de Estudios del Agua (CREA), UCLM, Ctra de Las Peñas km. 3.2, 02071 Albacete, [Jorge.Cervera@uclm.es](mailto:Jorge.Cervera@uclm.es)

<sup>2</sup> Ingeniero Técnico Agrícola, Investigador; Centro Regional de Estudios del Agua (CREA), UCLM, Ctra. de Las Peñas km. 3.2, 02071 Albacete; [Amaro.Castillo@uclm.es](mailto:Amaro.Castillo@uclm.es)

<sup>3</sup> Dr. Ingeniero Agrónomo, Titular de Universidad; Centro Regional de Estudios del Agua (CREA), UCLM, Ctra de Las Peñas km. 3.2, 02071; [Jesus.Montero@uclm.es](mailto:Jesus.Montero@uclm.es)

<sup>4</sup> Dr. Ingeniero Agrónomo, Catedrático de Universidad; Centro Regional de Estudios del Agua (CREA), UCLM, Ctra de Las Peñas km. 3.2, 02071; [Jose.Tarjuelo@uclm.es](mailto:Jose.Tarjuelo@uclm.es)

<sup>5</sup> Dr. Ingeniero Agrónomo, Profesor Contratado Doctor; Centro Regional de Estudios del Agua (CREA), UCLM, Ctra de Las Peñas km. 3.2, 02071; [MiguelAngel.Moreno@uclm.es](mailto:MiguelAngel.Moreno@uclm.es)

### Resumen

Los sistemas de riego en agricultura suponen una gran demanda de energía debido a las extracciones desde captaciones subterráneas o superficiales y a la aplicación de la presión necesaria en las subunidades de riego. Actualmente, los elevados precios en los combustibles fósiles y la energía junto a la preocupación por la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>, han propiciado un importante avance en los sistemas de bombeo solar, siendo la energía solar fotovoltaica una energía limpia y renovable, de fácil instalación y mantenimiento, con una larga vida útil y una alta fiabilidad. En el desarrollo de este estudio se ha analizado de forma conjunta el modelo hidráulico y fotovoltaico creado para gestionar el riego por goteo en inyección directa de una plantación de almendro de 90 ha, alimentada con placas solares con el fin de optimizar los valores de presión y caudal necesarios en las diferentes subunidades de riego existentes. Además, se ha tenido en cuenta un aspecto clave como es la uniformidad de emisión para la determinación de la calidad del riego en la explotación.

### Abstract

The agricultural irrigation systems spend big quantity of energy to extract water from groundwater or surface water and maintain the pressure demand in the irrigation subunits. At the moment, the high fossil fuels and energy prices moreover the deep concern by the emissions of CO<sub>2</sub> have made that the solar water pumping have had an important impact because the solar energy is clean and renewable energy, easy installation and maintenance with a long service life and great reliability. In this study analyze the hydraulic model and photovoltaic model together used to managing the dripping irrigation by direct injection in almond fields of 90 ha that is fed by photovoltaic system to optimizing the pressure and flow rate in a different subunits. Moreover, another important thing is the uniformity of the system to know the quality of irrigation

## 1- Introducción y Objetivos

Para impulsar el desarrollo de una agricultura sostenible sería necesario obtener costes bajos y eficientes sistemas de riego que eviten el excesivo bombeo de las aguas subterráneas ayudados por políticas compensatorias entre el ahorro de agua, las emisiones de CO<sub>2</sub> y la producción de alimentos (Daccache et al. 2014).

No obstante, el óptimo de funcionamiento de un sistema de riego debería conseguirse teniendo en cuenta criterios tanto medioambientales, vinculados con la huella hídrica y huella de carbono, como económicos. Por tanto es necesario el desarrollo de herramientas y modelos que puedan contribuir directamente a mejorar el uso del agua y la energía en el regadío.

Los principales aspectos que deberían ser considerados en el proceso de diseño y dirección de un sistema de riego pasan por maximizar la uniformidad, minimizar las pérdidas por evaporación obteniendo el coste total mínimo del sistema determinado sus requerimientos. El diseño de un sistema de riego depende de la forma con la que es alimentado, con las siguientes opciones:

- Sistemas de inyección directa desde la fuente de agua al sistema de riego.
- Desde un depósito o embalse de agua por diferencia de cota.
- Redes colectivas de riego para abastecimiento de agua.

Cada una de estas configuraciones requiere el desarrollo de diferentes algoritmos para el diseño y la optimización del sistema. El sistema más comúnmente utilizado es el de la extracción de agua desde el pozo hasta un embalse mientras exista radiación solar para su almacenamiento, y posteriormente por gravedad o rebombeo realizar la inyección al sistema de riego. En este trabajo el sistema elegido para la realización del estudio es el de inyección directa desde sondeo.

Se han desarrollado numerosos estudios de aplicación de sistemas fotovoltaicos para el riego, como Yu et al. (2011), que realizaron un estudio de viabilidad del riego solar para zonas de pastos en China. Kelley et al. (2010) desarrollaron un estudio de viabilidad de estos sistemas y los compararon con fuentes de energía convencionales, como el gasoil o sistemas eléctricos. Glasnovic y Margeta (2007) desarrollaron un modelo para optimizar la potencia del sistema fotovoltaico. Estos son una pequeña muestra de distintos estudios sobre el bombeo solar para riego.

Moreno et al. (2012) desarrollaron un software para el diseño óptimo de pivot y sistemas laterales alimentados directamente de pozos, considerando la relación teórica entre la curva característica y de rendimiento de la bomba (Moreno et al. 2009), variables hidrológicas (variación temporal del agua), variables de suelo (parámetros de infiltración, capacidad de almacenamiento superficial), variables hidráulicas (pérdidas en cabecera en tuberías, caudal demandado) y variables económicas (costes energéticos, costes de tuberías y bombas) en el proceso óptimo.

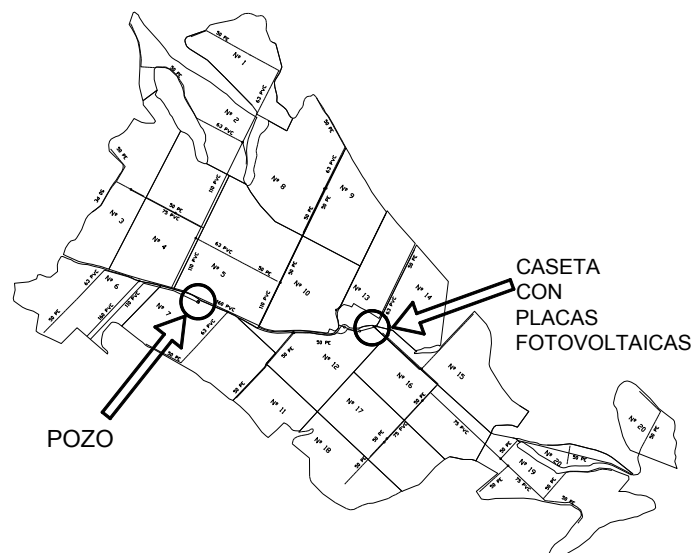
Carrion et al. (2013 y 2014) desarrollaron una herramienta DSS (Decision Support System) denominada PRESUD para el diseño óptimo hidráulico de subunidades regulares de riego, tanto localizado como aspersión, con el coste total mínimo (operación e inversión) por unidad regada considerando el tamaño y tipo de bomba junto con el sistema de riego. El uso de estas herramientas hace posible la determinación con exactitud de la uniformidad del sistema.

A pesar de ser numerosos los estudios tanto de sistemas de bombeo solar como de modelización y diseño óptimo de sistemas de riego, no se han encontrado referencias de integración de modelos hidráulicos precisos con modelos de sistemas de producción de energía fotovoltaicos, que permitan gestionar de forma eficiente los sistemas de riego de inyección directa.

## 2- Materiales y métodos

La realización de este estudio se centra en una finca agraria con una superficie de 90 ha de almendros, con marco de  $7 \times 7 \text{ m}^2$  regada mediante un sistema de riego localizado. La finca está situada en el término municipal de Hellín, al sureste de la provincia de Albacete. La finca está dividida en 20 subunidades y cuenta con grandes pendientes incluso entre subunidades.

La finca cuenta con su propio sistema de riego compuesto por la red de distribución, las tuberías terciarias y los ramales portagoteros. Los emisores son autocompensantes, con un caudal de diseño de 1,75 l/h. El agua suministrada a la plantación procede de un pozo subterráneo a la profundidad de 200 m, mediante una bomba sumergida de 26 kW. En la **figura 1** se muestra el plano con las subunidades, la red de distribución, ubicación de la caseta y pozo.



**Figura 1.** Plano de la finca con las subunidades, la red de distribución, ubicación de la caseta y pozo.

En la cubierta de la caseta, que se encuentra en el interior de la finca, se instalaron un total de 136 paneles fotovoltaicos, con una disposición de 8 ramales en paralelo con 17 paneles por ramal. La potencia instalada es de 31.960 W, siendo la potencia unitaria por panel de 235 W. Para la transformación de la corriente continua generada por los módulos a corriente alterna y gestión de la velocidad de giro de la bomba se utiliza un variador que tiene una potencia de 30 kW. La instalación fotovoltaica está compuesta por los módulos fotovoltaicos, el inversor y el cableado. El cableado está dividido en dos tramos: el primero va de los módulos al inversor, con 1 m longitud y una sección de  $150 \text{ mm}^2$ , y el segundo tramo va del inversor a la bomba, con una longitud 450 m y una sección también de  $150 \text{ mm}^2$ , todos ellos de aluminio.



Los datos de radiación ( $W/m^2$ ) y temperatura ambiente ( $^{\circ}C$ ) han sido obtenidos de la estación meteorológica de Hellín con coordenadas UTM X: 612321, UTM Y: 4260580 y altitud: 579 m.

Para realizar el análisis con mayor precisión se han desarrollado dos modelos separadamente, un modelo fotovoltaico y un modelo hidráulico. Posteriormente estos dos modelos se han unificado creando un único modelo denominado PRESUD-Solar. Estos han sido programados en MATLAB® (de MathWorks Inc.), con el fin de crear una herramienta que permita analizar y optimizar la distribución de agua en las 20 subunidades irregulares, identificando la presión y el caudal según los distintos niveles de radiación.

Para el desarrollo del modelo hidráulico se ha modelizado el sistema de riego delimitando cada sector, la distribución de las tuberías terciarias, la distribución de los ramales portagotos, ubicación de la válvula en cabecera para cada sector, ubicación del pozo, etc. Mediante la herramienta MATLAB® (de MathWorks Inc.), se han implementado todas las subunidades individualmente, utilizando el modelo digital del terreno (MDT) de la zona para conocer las cotas de todos los emisores, así como las de las válvulas, generando los archivos para su posterior uso en EPANET comandado desde el modelo hidráulico programando en MATLAB®.

La ecuación general usada para el cálculo es la siguiente (Karmeli y Keller, 1975):

$$q_h = K \cdot h_e^x$$

Siendo  $q_h$  el caudal del emisor,  $K$  el coeficiente del emisor,  $x$  el exponente del emisor y  $h_e$  la presión en cabecera del emisor.

Para el cálculo hidráulico se han utilizado las librerías de EPANET (Rossman, 2000) programadas en MATLAB® (de MathWorks Inc.), obteniendo la curva Q-H para cada subunidad considerando la válvula en cabecera como un único emisor en toda la subunidad calculando la presión y el caudal en cabecera. Además de ello se ha obtenido la uniformidad de emisión que dará idea de la distribución de agua apropiada.

Las pérdidas de carga generadas desde el inicio del pozo hasta la válvula de cabecera de cada subunidad se han calculado mediante la fórmula de Hazen-William siendo mayoradas en un 10%. Se puede utilizar también la ecuación de Darcy-Weisbach o Scimemi.

$$h_f = 10,62 C^{-1,85} D^{-4,87} Q_0^{1,85} L$$

Los datos de entrada necesarios al modelo son el plano de simulación de la subunidad, la curva característica de la bomba, longitudes y diámetros de las tuberías de distribución y el dato de la presión máxima admisible en los ramales portagotos.

Para el desarrollo del modelo fotovoltaico se han tenido en cuenta diferentes etapas que se explican a continuación.

1º etapa: Captación de la radiación solar

En esta etapa la radiación solar sobre plano horizontal (IH) captada por el piranómetro (expresada en  $W/m^2$ ) obtenida de la estación meteorológica más cercana es transformada a radiación solar sobre plano inclinado (IT) teniendo en cuenta características tales como la inclinación de las placas ( $s$ ) ( $^\circ$ ), la latitud ( $\varphi$ ), la constante solar ( $I_{sc}$ )( $W/m^2$ ), el albedo ( $\rho$ ) (adimensional), el día Juliano, la radiación incidente sobre plano horizontal (IH) ( $W/m^2$ ) y la temperatura ambiente ( $^\circ C$ ).

La radiación solar sobre plano inclinado (IT) se expresa de la siguiente manera:

$$IT = R \cdot IH$$

Siendo:

R = Factor de conversión (Liu y Jordan 1960; Duffie y Beckman, 1996)

IH = radiación solar sobre plano horizontal

### 2º etapa: Cálculo de la potencia máxima del generador según el nivel de radiación

Para los cálculos que se van a realizar en esta etapa se han obtenido las características de trabajo de los paneles fotovoltaicos que han sido suministradas por el fabricante tales como la Corriente de Cortocircuito (Short Circuit Current, ISC) en Condiciones Estándar de Medida (Standart Test Conditions, STC) en amperios, la Tensión a Circuito Abierto (Open Circuit Voltage, VOC) en Condiciones Estándar de Medida (Standart Test Conditions, STC) en voltios, la Temperatura de Operación Nominal de la Célula (Nominal Operating Cell Temperature, NOCT) en grados centígrados, la Tensión en el punto de máxima potencia ( $V_{MAX}$ ) en Condiciones Estándar de Medida (Standart Test Conditions, STC) en voltios, la corriente en el punto de máxima potencia ( $I_{MAX}$ ) en Condiciones Estándar de Medida (Standart Test Conditions, STC) en amperios y el número de células en serie.

Los parámetros calculados más importantes según la radiación solar, con el fin de obtener la potencia máxima del generador, son los siguientes:

- Corriente de cortocircuito de la célula (ISC).
- Temperatura de trabajo de la célula.
- Tensión de circuito abierto de la célula (VOC).
- Tensión de célula normalizada.
- Voltaje térmico.
- Factor de forma ideal sin considerar la resistencia serie.
- Resistencia normalizada.
- Factor de Forma en STC.
- Tensión en el punto de máxima potencia ( $V_{MAX}$ ).
- Corriente en el punto de máxima potencia ( $I_{MAX}$ ).
- Máxima potencia del panel ( $P_{MAX}$ ), calculada como  $I_{MAX} \cdot V_{MAX}$

### 3º etapa: Cálculo de la potencia máxima del generador fotovoltaico

En esta etapa se han calculado, según la potencia máxima del panel obtenida anteriormente, la potencia máxima suministrada por el generador fotovoltaico, a partir de la tensión máxima del generador fotovoltaico y de la corriente máxima del generador fotovoltaico.





Además, se han calculado las pérdidas de potencia que se producen en los módulos fotovoltaicos debido a que estos operan en condiciones diferentes a las estándar teniendo en cuenta pérdidas por:

- Pérdidas de potencia debidas al polvo sobre los módulos FV.
- Pérdidas de potencia por dispersión de parámetros entre módulos.
- Pérdidas de potencia por reflectancia angular espectral.

4º etapa: Cálculo de las pérdidas de potencia que se producen en el cableado de los módulos fotovoltaicos al inversor.

En esta etapa se calculan las pérdidas de potencia que se producen en el cableado que une los módulos fotovoltaicos hasta el inversor. Para su cálculo se ha utilizado el criterio de la resistencia del conductor empleando además la intensidad máxima circulante por el conductor y el número de conductores tratándose de corriente continua.

5º etapa: Cálculo de la potencia del inversor.

En esta etapa se ha calculado la potencia de entrada al inversor en continua calculándose el rendimiento del inversor teniendo en cuenta los coeficientes de pérdidas características del inversor mediante los valores medios obtenidos por (Schmidt 1992) a partir de una muestra representativa de inversores existentes en el mercado.

6º etapa: Cálculo de las pérdidas de potencia que se producen en el cableado del inversor a la bomba.

En esta etapa se calculan las pérdidas de potencia que se producen en el cableado que une el inversor a la bomba. El cálculo general es el mismo que para la 4º etapa siendo el único cambio la obtención de la corriente circulante del conductor al tratarse de corriente alterna en trifásica.

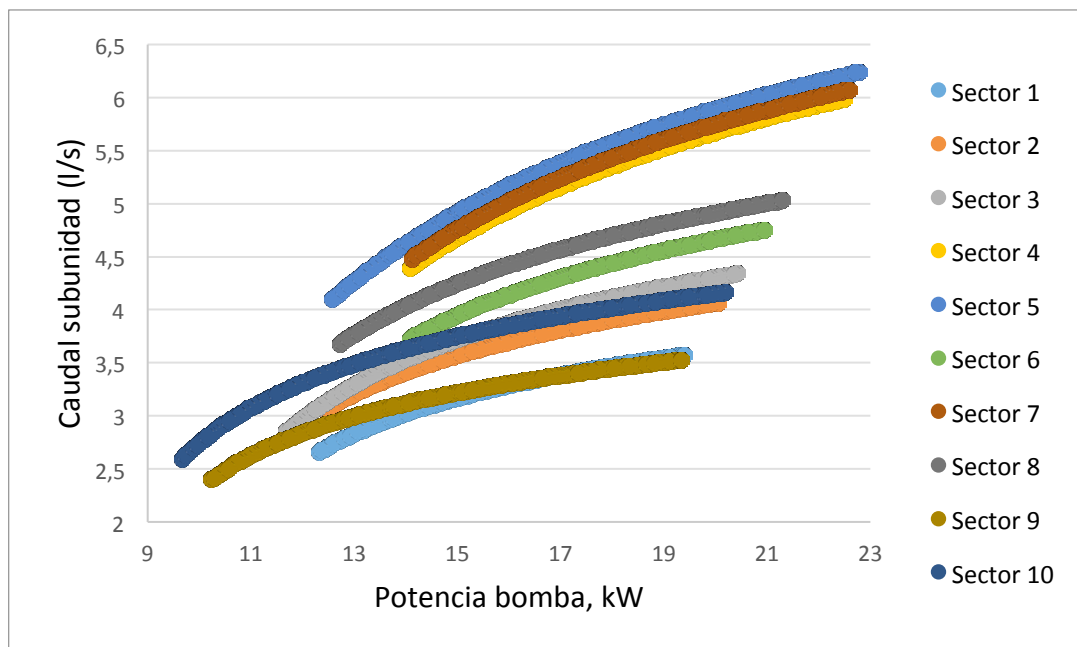
7º etapa. Cálculo de la potencia de entrada de la bomba

En esta etapa se ha obtenido la potencia de entrada de la bomba en corriente alterna como la diferencia entre la potencia de salida del inversor y las pérdidas de potencia en el cableado.

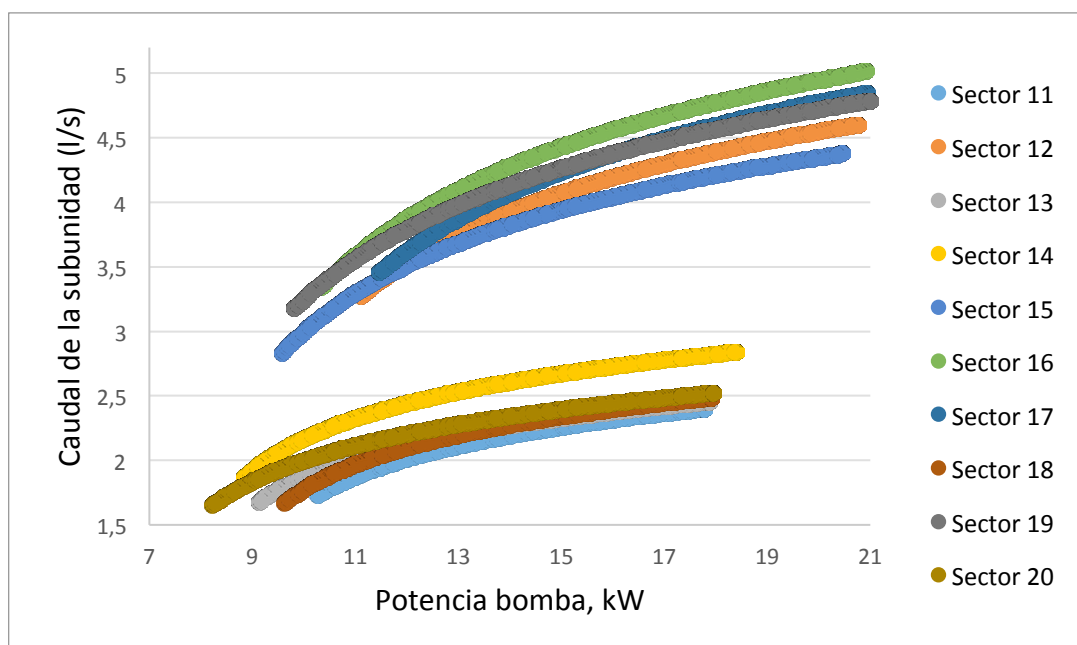
Una vez obtenidos y evaluados los resultados de potencia de la bomba para cada modelo estudiado según los parámetros característicos descritos anteriormente mediante la herramienta MATLAB® (de MathWorks Inc.) se han unificado permitiendo conocer para cualquier día del año y con datos de radiación solar tomados cada media hora del día conocer los valores de presión, caudal y uniformidad de emisión en cualquier subunidad.

### 3- Resultados y discusión

En las **figuras 2 y 3** se representa la relación entre la potencia absorbida por la bomba y los caudales suministrados por las subunidades de la 1 a la 10 y de la 11 a la 20 respectivamente.



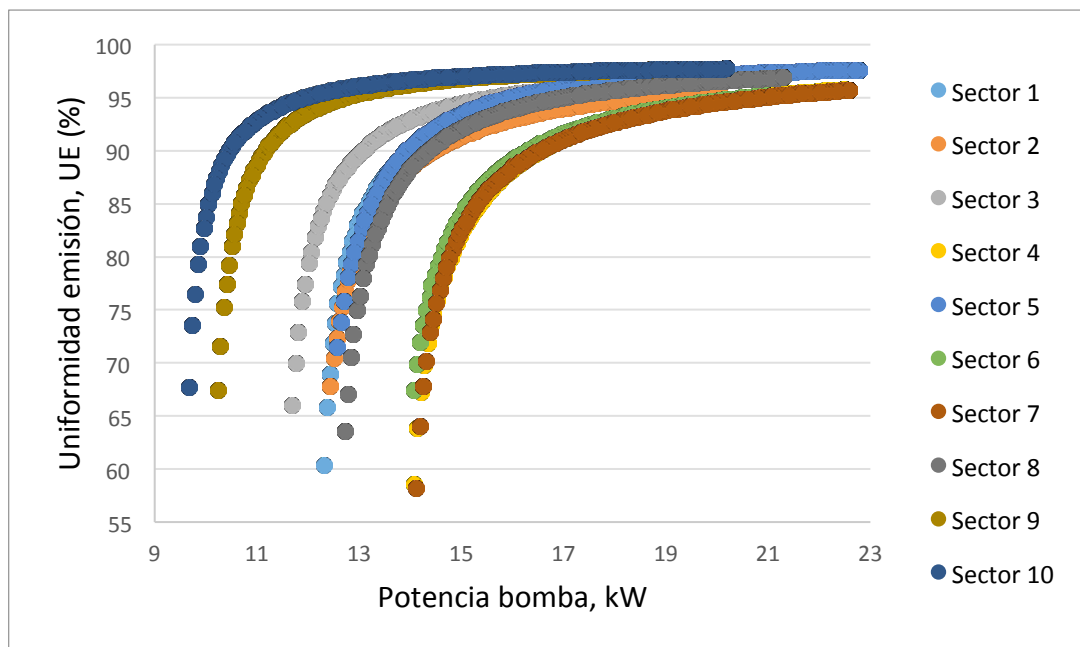
**Figura 2.** Relaciones entre la potencia absorbida por la bomba y los caudales suministrados por las subunidades de la 1 a la 10.



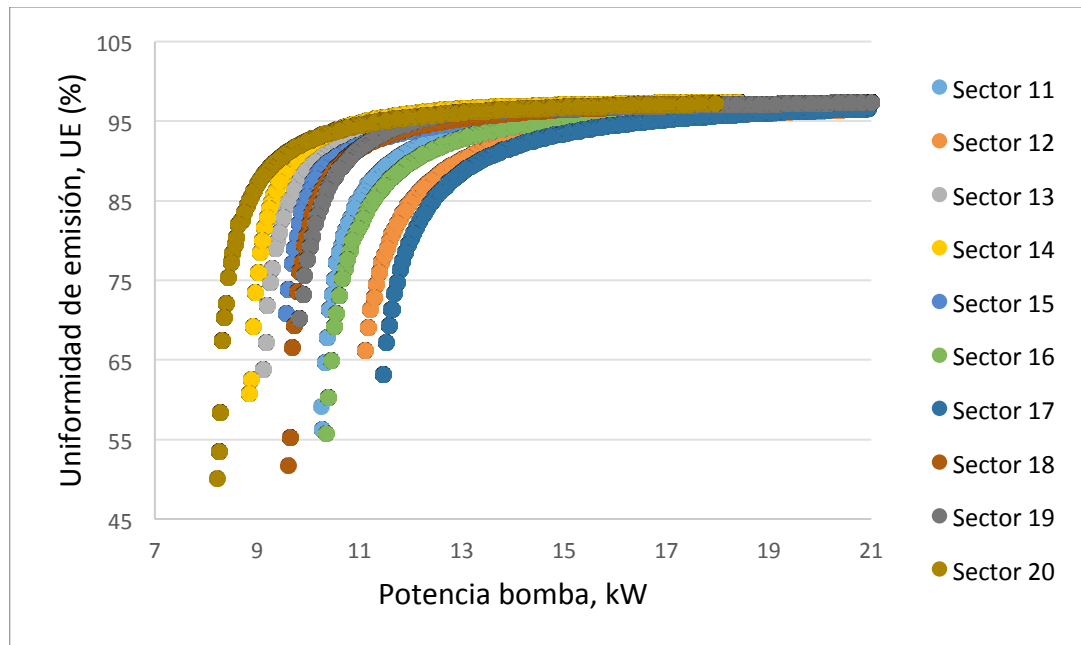
**Figura 3.** Relaciones entre la potencia absorbida por la bomba y los caudales suministrados por las subunidades de la 11 a la 20.

Los resultados reflejados en las figuras anteriores muestran que existen algunas subunidades que presentan disponibilidades de caudales y potencias elevadas mientras en otras subunidades los caudales y potencias disponibles son reducidos. Esto da una idea de cuales son aquellas subunidades las cuales es posible obtener a igualdad de potencia unos caudales mayores.

De la misma forma, en las **figuras 4 y 5** se representa la relación entre la potencia absorbida por la bomba y la uniformidad de emisión de las subunidades, de la 1 a la 10 y de la 11 a la 20, respectivamente.



**Figura 4.** Relaciones entre la potencia absorbida por la bomba y la uniformidad de emisión suministrados por las subunidades de la 1 a la 10.



**Figura 5.** Relaciones entre la potencia absorbida por la bomba y la uniformidad de emisión suministrados por las subunidades de la 11 a la 20.

Los resultados reflejados en las figuras anteriores muestran que existen subunidades con valores de uniformidad de emisión alta coincidentes con las que tienen caudales altos incluso a bajas potencias mientras que otras subunidades no alcanzan una buena uniformidad de emisión hasta que las potencias absorbidas son elevadas.

Esta información será utilizada para desarrollar un modelo de ayuda a la toma de decisiones enfocado hacia la secuencia de activación de cada sector y el tiempo de riego adecuado según los niveles de radiación existentes y esperados.

#### 4- Conclusiones y recomendaciones

Las conclusiones más importantes obtenidas en este estudio indican la clara influencia que tienen los diferentes niveles de radiación solar que se producen durante el día para alcanzar los requisitos establecidos en cada subunidad de caudal, presión y uniformidad de emisión. Esto se observa más claramente en aquellas subunidades que presentan condiciones más desfavorables en donde las necesidades de potencia son mayores, propiciando que no se puedan alcanzar con tanta facilidad los requisitos de caudal, presión y uniformidad de emisión deseados.

Por tanto, la cuantificación precisa de estos valores permite adecuar la secuencia de riego de las distintas subunidades a los niveles de radiación estimando de forma precisa los caudales suministrados en cada periodo. Además, la herramienta generada permite determinar la uniformidad de emisión en la subunidad y por lo tanto determinar la calidad del riego y no sólo el volumen suministrado.



## 5- Bibliografía

- Carrión, F., Montero, J., Tarjuelo, J.M., Moreno, M.A. (2014). Design of sprinkler irrigation subunit of minimum cost with proper operation. Application at corn crop in Spain. *Water Resour. Manag.*, 28, 5073–5089.
- Carrión, F., Tarjuelo, J.M., Hernández, D., Moreno, M.A. (2013). Design of microirrigation subunit of minimum cost with proper operation. *Irrig. Sci.*, 31(5), 1199-1211.
- Daccache, A., Ciurana, J.S., Rodriguez Diaz, J.A., Knox, J.W. (2014). Water and energy footprint of irrigated agriculture in the Mediterranean region. *Environ. Res. Lett.*, 9, 124014 (12pp).
- Duffie, J.A., Beckman, W.A. (1996). *Solar Energy Thermal Processes*. Ed. Pergamon. Madrid
- Glasnovic, Z., Margeta, J. (2007). A model for optimal sizing of photovoltaic irrigation water pumping systems. *Solar Energy*, 81, 904–916.
- Karmeli, D., Keller, J. (1975). *Trickle irrigation design*. Rain Bird Sprinkler Manufacturing Corp. Glendora, 133p.
- Kelley, L.C., Gilbertson, E., Sheikh, A., Eppinger, S.D., Dubowsky, S. (2010). On the feasibility of solar-powered irrigation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 2669–2682.
- Liu, B.Y.H. y Jordan, R.C. (1960). The interrelationship and characteristics distribution of direct, diffuse, and total solar radiation. *Solar Energy*, 4, 1-19.
- Moreno, M.A., Medina, D., Ortega, J.F., Tarjuelo, J.M. (2012). Optimal design of centre pivot systems with water supplied from wells. *Agricultural Water Management*, 107, 112-121.
- Moreno, M.A., Planells, P., Córcoles, J.I., Tarjuelo, J.M., Carrión, P.A. (2009). Development of a new methodology to obtain the characteristic pump curves that minimize the total cost at pumping stations. *Biosyst. Eng.*, 102 (1), 95-105.
- Rossman, L.A. (2000). *EPANET 2, users' manual*, Water supply and Water Resources Division, National Risk Management Research Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati.
- Jantsch, M., Schmidt, H., Schmid, J. (1992). Results on the concerted action on power conditioning and control, 11th European photovoltaic Solar Energy Conference, Montreux, pp. 1589-1592.
- Yu, Y., Liu, J., Wang, H., Liu, M. (2011). Assess the potential of solar irrigation systems for sustaining pasture lands in arid regions – A case study in Northwestern China. *Applied Energy*, 88, 3176-3188.



## RESULTADOS PRELIMINARES EN LOS ESTUDIOS DE IMPLANTACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES EN EL REGADÍO DEL PROYECTO I+D+i OPTIREG: GESTIÓN EFICIENTE DE REGADÍOS

*Fernández, K. 1, Ortega, A. 2, Carpio, F.3, Mayordomo, A 4, Martínez, M.A.5, Iglesias, S.6*

*1 Ingeniero Agrónomo, responsable técnico de proyecto OPTIREG1316, Gerencia de Ingeniería y Edificación (Tragsatec), Julián Camarillo 6, 28037 Madrid, kfg@tragsa.es*

*2 Ingeniero Industrial en proyecto OPTIREG1316, Gerencia de Ingeniería y Edificación (Tragsatec), Julián Camarillo 6, 28037 Madrid, aortega3@tragsa.es*

*3 Ingeniero Industrial en proyecto OPTIREG1316, Gerencia de Ingeniería y Edificación (Tragsatec), Julián Camarillo 6, 28037 Madrid, fcarpio@tragsa.es*

*4 Ingeniero Agrónomo e Ingeniero de Montes en proyecto OPTIREG1316, Gerencia de Ingeniería y Edificación (Tragsatec), Julián Camarillo 6, 28037 Madrid, amm@tragsa.es*

*5 Ingeniero Técnico Industrial en proyecto OPTIREG1316, Gerencia de Ingeniería y Edificación (Tragsatec), Julián Camarillo 6, 28037 Madrid, mmes@tragsa.es*

*6 Ingeniero Agrónomo. Master in International Trade. Responsable de apoyo y supervisión de proyecto OPTIREG1316. Subdirección de I+D+i (Tragsa), Conde Peñalver 84, Madrid, siglesia@tragsa.es*

### Resumen

OPTIREG, tiene el objetivo de alcanzar nuevas posibilidades de ahorro a partir de una buena gestión en toda la cadena de valor. Para ello trabaja en cuatro bloques interrelacionados: 1) implantación de energías renovables, 2) mercados eléctricos y compra-venta de energía, 3) eficiencia hídrica y 4) eficiencia energética.

En el presente Trabajo Técnico se presentan los resultados obtenidos, hasta el momento, en el bloque 1) implantación de energías renovables, mediante el cual se busca una disminución del coste energético del regadío, así como una mayor independencia de los proveedores de electricidad. Se ha investigado el uso y rentabilidad de la energía fotovoltaica, eólica y minihidráulica para su integración en una red de regadío actual.

### 1.- Introducción.

La modernización de los regadíos, pasando del riego por gravedad al riego presurizado, trae aparejado un aumento considerable del consumo de energía eléctrica. Esto, sumado al escenario de precios crecientes de este tipo de energía, plantea el estudio de incorporar innovaciones tecnológicas en las zonas regables, tanto actuales como futuras, para conseguir zonas regables eficientes desde el punto de vista energético y económico.

A través del desarrollo del proyecto de I+D+i "Gestión Eficiente de regadíos" (OPTIREG1316) que inició su actividad a mediados del año 2013, el Grupo Tragsa apuesta por dar soluciones al problema energético de las zonas regables. Una óptima administración



en las zonas regables actuales y futuras permite una mayor eficiencia hidroenergética y por consiguiente una mayor rentabilidad económica en la agricultura de regadío.

La disminución del coste energético debe abordarse mediante una estrategia global: disminuyendo la potencia y la energía consumidas, pero también disminuyendo el coste de las mismas. Lo primero se puede conseguir mediante la mejora de la eficiencia energética de las instalaciones, así como con una programación de riegos óptima. Lo segundo mediante una optimización de la compra de la misma, pero también a través de la correcta instalación de un generador de electricidad mediante energías renovables, el cual sea capaz de ofrecer una electricidad más barata que la adquirida, procedente de la red.

## 2.- Materiales y Métodos

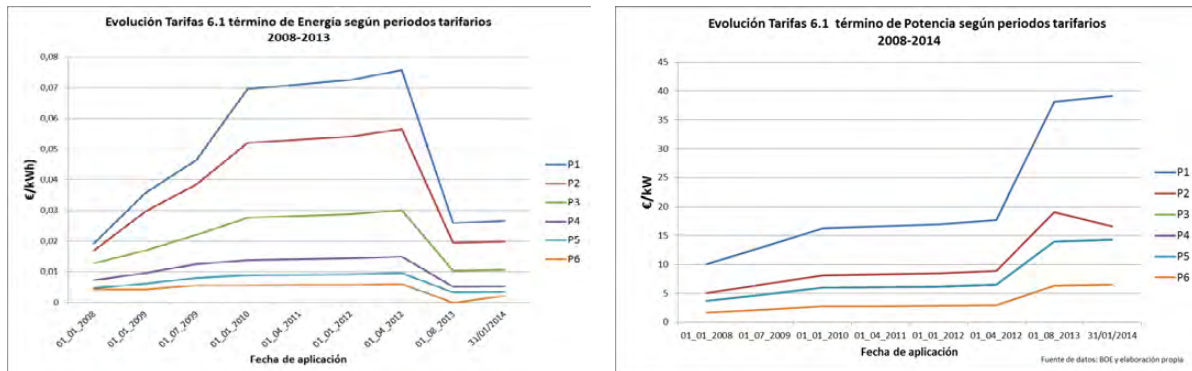
El marco regulatorio del sector eléctrico es complejo, debido principalmente a que depende de un gran número de reales decretos y órdenes ministeriales parcialmente derogados, por lo que se ha estudiado la normativa y su evolución desde la liberación del sector en 1997. Las actuales limitaciones que ofrece la normativa a las instalaciones productoras de electricidad mediante energías renovables, junto con la incertidumbre de la evolución de la misma han llevado a cabo la paralización del sector en el país durante los últimos dos años. Las posibilidades técnicas de conexión entre el generador eléctrico y la bomba de agua pasan por una instalación de *autoconsumo* o por una *aislada* (también conocida como *en isla*). Ambas posibilidades se permiten en la actual normativa, sin embargo es mucho más sencilla y previsiblemente estable en el tiempo, la normativa referida a una instalación aislada, ya que en este caso al no estar conectada a la red nacional de electricidad no está sujeta a cambios imprevisibles.

La opción del autoconsumo es muy interesante desde el punto de vista técnico, no sólo porque proporciona una mayor modularidad y seguridad al regante, ya que el 100% de su instalación sigue conectada a la red convencional, sino también por:

- Producir electricidad durante todo el año, una instalación de autoconsumo convencional permite aprovechar la electricidad generada fuera de la campaña de riego al poderla verter en la red, lo cual acortaría el tiempo de amortización de la instalación. Sin embargo la normativa actual no contempla el balance cero, es decir, compensar dicha energía vertida a la red durante el invierno por aquella que faltará y se consumirá de la red en verano, durante la campaña de riego. Actualmente se puede vender la electricidad excedentaria producida, pero esto conlleva unas importantes complicaciones administrativas y legales, además de ponerse en duda la rentabilidad económica. Vender el excedente de electricidad, tiene en la actualidad las siguientes limitaciones: se cobra precio de mayorista en la venta y se paga precio de minorista en la compra, es obligatorio darse de alta como receptor de IVA y de impuestos especiales, si la potencia de la instalación es mayor de 100KW la normativa te considera productor de electricidad con la consiguiente complicación administrativa y legal (depósito de aval, etc...).
- Instalaciones de bombeo de mucha potencia (del orden de miles de kilovatios), en las que desconectar una bomba implicaría una instalación de potencia renovable excesiva, ya sea por limitación de la tecnología, superficie, precio...

Por otro lado, la evolución de las tarifas eléctricas en los últimos años, con una subida del término de potencia y una bajada en el de energía disminuyen la rentabilidad de este tipo de

instalación, ya que es el término de potencia el que no se puede eliminar de la factura eléctrica con estas instalaciones.



**Figura 1.** Evolución de la tarifa 6.1

La inversión en una instalación renovable es una inversión a largo plazo, entre 15 y 30 años según tecnología, por lo que la estabilidad jurídica y financiera es importante. Por ello, de momento el proyecto OPTIREG trabajará con instalaciones aisladas de la red.

Las tres fuentes renovables planteadas para producir la electricidad necesaria para el bombeo de agua son: fotovoltaica, eólica y minihidráulica. Cada una de ellas con distintas características que se repasan a continuación.

### Fotovoltaica

Se trata de una tecnología modular, por lo que podemos ir aumentando la potencia instalada y, por tanto nuestra inversión, de forma escalonada en el tiempo sin incurrir en costes mayores. El recurso solar está medido en todo el territorio nacional y es previsible en el tiempo y espacio. La evolución de la irradiación recibida en un emplazamiento a lo largo de un año sigue una curva similar a la del consumo energético del regadío, lo que hace de la solar una fuente de energía idónea para el bombeo. Una instalación de bombeo solar crea poco impacto medioambiental, sin embargo en potencias altas como las necesarias para una comunidad de regantes, la extensión necesaria para los paneles puede llegar a ser importante, unos 2.500m<sup>2</sup> para una instalación de 100kW. La fotovoltaica aislada es una tecnología madura en el país, por lo que aunque su aplicación en el bombeo de alta potencia es reciente, resulta sencillo y barato encontrar empresas de mantenimiento.

### Eólica

La eólica es una tecnología no modular, y que además ofrece mejores precios unitarios a mayor potencia, lo que hace que debamos dimensionar la potencia del aerogenerador para toda la vida de la instalación desde el principio y de manera muy precisa. El viento es un recurso mucho más variable que el sol, y mucho más difícil de medir. Para una correcta caracterización del viento en una ubicación sería necesaria una campaña de mediciones a la altura del eje del generador durante al menos un año, lo cual implicaría un coste y un tiempo demasiado elevados para una instalación de este tipo. El viento en una ubicación se caracteriza mediante la función de Weibull, distribución de probabilidad de la velocidad del



viento en la ubicación. Existen bases de datos para cualquier punto del país basadas en modelos numéricos apoyados en datos de estaciones meteorológicas, este tipo de base de datos son usadas por los pequeños instaladores de eólica. Sin embargo, en la mayoría de casos no existirá una ubicación cercana al punto de consumo con una cantidad de viento suficiente como para hacer rentable la instalación. Aún en los puntos de consumo donde sí se disponga de buenos vientos para la generación de electricidad, lo más probable es que en unas decenas de kilómetros exista una ubicación con suficiente viento como para que sea rentable la construcción de una pequeña línea de transporte de electricidad con sus correspondientes transformadores.

Tanto la energía eólica como la minihidráulica tienen el problema, al trabajar en aislada, de la excitación del generador eléctrico utilizado, ya que normalmente se utilizan generadores asíncronos en estas tecnologías. En estos casos la inversión se encarecería y complicaría ligeramente en comparación con una instalación conectada a la red.

### **Minihidráulica**

El recurso hidráulico para la generación de electricidad en una comunidad de regantes es muy concreto y limitado. A diferencia de las otras tecnologías, en este caso el recurso renovable aprovechable para la generación de electricidad no depende de su ubicación, sino de su red de riego, lo cual hace que:

- Dicho recurso sea perfectamente conocido y predecible al 100%, por lo que podremos saber en todo momento la cantidad de energía que se generará.
- Sea difícil de calcular sin conocer con detalle la red de riego.

Su instalación no genera ningún tipo de impacto en el medio, ya que se integra en la red de agua. Conlleva un mayor coste de inversión inicial, pero si se dispone de un salto de presión de tamaño suficiente el coste de la energía obtenida es realmente competitivo.

Para el desarrollo del proyecto se ha llevado a cabo un estudio básico sobre la viabilidad técnica y económica en una veintena de comunidades de regantes interesadas. Entre estas comunidades se han elegido, siguiendo criterios tanto técnicos como económicos y organizativos, aquellas que servirán de piloto en el proyecto. En dichas comunidades piloto se llevará a cabo un estudio detallado de las posibilidades técnicas reales de implantación de energías renovables en las actuales instalaciones de regadío. Aquellas comunidades que decidan llevar a cabo las instalaciones propuestas por OPTIREG recibirán el asesoramiento necesario para llevar a cabo con seguridad y tranquilidad su inversión.

### **3.- Resultados y Discusión**

La integración de energías renovables en aislado, en las instalaciones actuales de regadío en España conlleva una serie de necesidades y restricciones en las redes (hidráulica y eléctrica) mínimas, tanto desde el punto de vista técnico como administrativo. La mayoría de instalaciones cumplen estas necesidades y restricciones sin mayor problema. El caso de la minihidráulica es la excepción, ya que para la producción de electricidad con un rendimiento y unos costes competitivos se hace necesario un salto de presión importante ubicado cerca del punto de consumo.

El principal parámetro que afecta a la rentabilidad de una instalación de este tipo es la cantidad de recurso renovable disponible. Tanto en fotovoltaica como en eólica éste depende de la ubicación, no es así el caso de la minihidráulica, que como se ha explicado depende únicamente de la red de riego. El recurso solar es predecible y varía poco en tiempo y espacio, sin embargo el eólico varía en gran medida tanto en tiempo como en espacio, lo que dificulta su caracterización.

Definiendo el factor de capacidad como la cantidad de horas al año (totales o relativas) que tendría que haber estado funcionando una instalación generadora de electricidad a su potencia nominal para generar la misma cantidad de energía que en condiciones reales podemos afirmar que:

- El factor de capacidad de una de una instalación fotovoltaica:
  - Es predecible en gran medida.
  - Varía poco en todo el territorio español.
  - Es afectado principalmente por la irradiación local y por el calendario de riego.
- El factor de capacidad de una instalación eólica:
  - Es difícil de predecir con precisión.
  - Varía mucho en decenas de kilómetros.
  - Es afectado principalmente por la distribución de Weibull en la ubicación del aerogenerador y por el calendario de riego.

Puesto que en una instalación de renovables la fuente de energía es gratuita, y por lo tanto los costes variables prácticamente nulos, el factor de capacidad influirá en gran medida en la rentabilidad de la instalación. A mayor factor de capacidad, mayor cantidad de energía eléctrica generada por la instalación, y por lo tanto se obtiene mayor rentabilidad, ya que los costes se mantienen prácticamente constantes.

A modo resumen se muestra la siguiente tabla para comparar tecnologías:

Tecnología	€/KW	FC	€/MW·h
Fotovoltaica	1300-1700	0,11-0,17	63
Eólica más de 300 KW	1000	< 0,34	> 32
Eólica menos de 300 KW	2000-6000	< 0,56	> 36
Minihidráulica	3000	0,2 -0,5	52

\*Datos y elaboración propios, precios con IVA incluido

En la columna €/KW se indica el precio aproximado del coste de la instalación, todo incluido. En el caso de la Eólica de menos de 300KW se indica un margen de precios medios amplio, ya que varía en gran medida; disparándose los costes por KW en instalaciones de menos de 100KW.

En la columna FC se muestran unos rangos de factores de capacidad tipo. En el caso de la fotovoltaica se han considerado instalaciones fijas, ya que la instalación de seguidores no es



rentable económicamente. En el caso de eólica se ha indicado el factor de capacidad máximo, ya que al variar tanto es imposible dar un valor medio, este factor de capacidad máximo es posible en muy pocas ubicaciones, por lo que hay que tener en cuenta que el precio indicado de la energía no es aplicable en la mayoría de casos. El factor de capacidad de una instalación minihidráulica dependerá principalmente de las horas de riego, por lo que en realidad se podrá tratar como un porcentaje de ahorro directo sobre la energía que se consume procedente de la red.

La rentabilidad económica de una instalación de este tipo viene dada por el ahorro producido al disminuir el consumo de electricidad, tanto de energía como de potencia. El uso de energías renovables implica una fuerte inversión inicial, (con o sin préstamo externo) a cambio de una producción de electricidad “prácticamente gratuita” durante toda la vida de la instalación, por lo que el ahorro real ofrecido por una instalación renovable depende del precio de adquisición de la electricidad por parte del consumidor. Este precio varía en gran medida de un consumidor a otro y depende de muchos factores: optimización del contrato y relación potencia contratada – energía consumida, optimización de periodos de facturación, tipo de contrato (precio fijo, indexado...), cantidad de compra total (agrupaciones de cc.rr. en juntas de compras).

La optimización en la compra de electricidad por parte de una cc.rr. es compleja, por lo que es otra línea de trabajo de OPTIREG, cuyos resultados se presentaron parcialmente en el XXXII Congreso Nacional de Riegos. En los últimos dos años el precio a tarifa ha variado enormemente, al sufrir éstas grandes cambios. Unos precios óptimos obtenidos de forma sencilla en los últimos años por las cc.rr. son aquellos conseguidos mediante su agrupación en juntas de compras, cuyo precio estimado en 110 €/MW·h podemos usar como parámetro de base para el cálculo de la rentabilidad de una instalación de energías renovables.

Según Eurostat, la electricidad ha aumentado en los últimos 15 años aproximadamente un 100% para consumidores industriales, lo que implica una subida superior al 6% anual. Para los cálculos de rentabilidad económica hemos considerado un precio constante de la electricidad, ya que esta tendencia podría llegar a revertirse si se dan las condiciones necesarias, principalmente un cambio en la normativa española actual y uso de fuentes de electricidad renovables, no dependientes del precio del petróleo.

Es de esperar que la rentabilidad mostrada en este estudio sea menor que la real final, sin embargo se ha preferido considerar un escenario conservador.

En el caso de bombeo solar la rentabilidad calculada varía desde el 6% anual en Segovia, regando de marzo a octubre y desperdiciando la electricidad generada fuera de la campaña de riego, lo que ofrece un plazo de recuperación de la inversión de 14 años para el agricultor. Si se pudiera aprovechar la irradiación recibida de noviembre a febrero este periodo se reduciría hasta los 9 años. En Almería, donde la irradiación es mayor y se riega durante todo el año la rentabilidad aumenta hasta el 10%, reduciendo el plazo de recuperación hasta los cuatro años.

En el caso del bombeo eólico la rentabilidad varía enormemente de una ubicación a otra, siendo imposible dar resultados a nivel nacional. Debido a la mayor incertidumbre que conlleva una instalación eólica de este tipo respecto a una fotovoltaica, su recomendación



será positiva únicamente en el caso de obtener una rentabilidad superior al 6% en el estudio previo.

De manera similar, con la minihidráulica no es posible ofrecer estimaciones de rentabilidad a nivel nacional, siendo necesario llevar a cabo la potencialidad de la instalación en cada red de riego individualizadamente.

#### **4.- Conclusiones y Recomendaciones**

En los últimos años se ha producido una fuerte subida en los costes eléctricos, tanto para grandes consumidores como para consumidores domésticos. Esto, unido al aumento en el consumo como consecuencia de las modernizaciones en los regadíos, ha provocado un gran aumento de costes energéticos para las cc.rr. que debe ser abordado con varias soluciones, como es el uso de ee.rr..

Tanto la fotovoltaica como la eólica o la minihidráulica están extendidas en España. Se trata de tecnologías maduras, que sin embargo, no han sido aplicadas aún de forma mayoritaria en el regadío de alta potencia.

La tecnología fotovoltaica es ideal para el bombeo de agua para regadío, ya que cuando más se necesita más disponibilidad ofrece, además de funcionar sin ningún tipo de problema y con un mantenimiento prácticamente nulo en régimen aislado.

La eólica resulta más compleja que la fotovoltaica y rentable en menos localizaciones, sin embargo, tiene una gran potencialidad en algunas zonas.

La minihidráulica depende totalmente de la red de riego y debe ser estudiada más a fondo en cada caso. Puede llegar a ofrecer una electricidad realmente barata y el mantenimiento que necesita es muy básico.

En general, la principal restricción en el uso de renovables para el bombeo de agua en el regadío es la cantidad de recurso renovable disponible, por lo que su aplicación puede llegar a extenderse de forma mayoritaria en el sector, sobre todo la fotovoltaica.





## RESULTADOS DE ENSAYOS DEL BANCO AUTOMÁTICO DE ASPERSORES

*Salvatierra Bellido, B. (1), Andrades Gonzalez, J.A(2), Gómez Durán, E. (3), Viqueira Pina, S. (4).*

<sup>1</sup> Tecnólogo titular, IFAPA Centro Chipiona, (Cádiz), [benito.salvatierra@juntadeandalucia.es](mailto:benito.salvatierra@juntadeandalucia.es)

<sup>2</sup> Técnico Colaborador, IFAPA Centro Chipiona, (Cádiz).

<sup>3</sup> Técnico Colaborador, IFAPA Centro Chipiona, (Cádiz).

<sup>4</sup> Técnico I+D+F, IFAPA Centro Chipiona, (Cádiz), [salvador.viqueira@juntadeandalucia.es](mailto:salvador.viqueira@juntadeandalucia.es)

### Resumen.

Desde el IFAPA Centro Chipiona como integrante del Sistema de Asesoramiento al Regante de la Junta de Andalucía, se da servicio a las zonas del bajo Guadalquivir y costeras de la provincia de Cádiz donde más profusamente se emplean los sistemas de riego por aspersión. Las características del riego por aspersión y la variabilidad de su eficiencia según las condiciones climáticas y de diseño, así como el alto número de variables ajustables en el manejo, alimentaron la necesidad de crear un sistema con el que ensayar el comportamiento de los diferentes aspersores frente a múltiples escenarios de viento. El objeto último del ensayo es dar respuesta esta necesidad para ello se creó en el IFAPA Centro Chipiona el primer banco automático de ensayo anemométrico de aspersores, presentado en el XXXII Congreso Nacional de Riegos, mediante el cual se ensayan las diferentes combinaciones de aspersión dentro de una matriz pluviométrica, tomándose registro de las condiciones climáticas para crear posteriormente escenarios de modelado, donde obtener la combinación de mayor eficiencia para las condiciones de diseño que se planteen.

### 1- Introducción y objetivos

Como primer sistema de riego se ha querido ensayar un aspersor de impacto circular, con doble boquilla, por ser uno de los más empleados en cobertura total por los usuarios del Sistema de Asesoramiento al Regante de nuestra zona del Bajo Guadalquivir y de la zona Regable de la Costa Noroeste de Cádiz.

Este trabajo tiene como objetivo presentar al sector los primeros resultados sobre el comportamiento del aspersor ensayado en el banco automático de aspersores del IFAPA centro Chipiona.

Como primer sistema de riego se ha querido ensayar un aspersor de impacto circular, con opción de doble boquilla, por ser uno de los más empleados en aspersión en la zona del Bajo Guadalquivir y de la zona Regable de la Costa Noroeste de Cádiz.

Se procedió al ensayo de los diferentes conjuntos de aspersión, hasta conseguir una muestra de una hora de viento estable estudiados para cada uno de los rangos.

### 2- Materiales y método.

Se eligió el aspersor de impacto con barrido circular de doble boquilla f46 de UNIRAIN.

Se eligen los complementos del aspersor:

- Boquillas: Se han probado diferentes boquillas para el aspersor ensayado. Los diferentes diámetros se identifican fácilmente por un código de colores.
- Vainas: Se ensayan las boquillas con vainas prolongadoras del chorro o sin ésta.

Se procedió a realizar en ensayo del aspersor para diferentes situaciones de presión, alta, media y baja, ( $2,5 \text{ kg/cm}^2$ ,  $3,5 \text{ kg/cm}^2$ ,  $4,5 \text{ kg/cm}^2$ ) la presión se fija en el cabezal mediante la actuación de una válvula de esfera.

Se agrupan los datos de viento en episodios donde el Vector *\_Viento* se mantenga constante, considerándose como muestra episodios de una hora en los que no se varía dirección ni velocidad más de un 10%. Los datos del vector viento, se recogen mediante una anemoveleta conectada al sistema. Se realiza una medición en continuo, registrando el dato medio de la variable cada 10 segundos, siendo nuestra muestra final las mediciones de una hora de viento estable, tendrá por tanto 360 mediciones registradas por cada situación.

Los sistemas de riego de aspersión suelen trabajar a una velocidad de viento en el rango de 0-4 metros por segundo. Se puede considerar que vientos superiores a cuatro metros por segundo conllevan una distorsión en la distribución del agua por parte del aspersor tan acentuada que sería imposible evaluar la tendencia de esta sobre el aumento en la velocidad del viento. Para analizar a la pluviometría del sistema ensayado es necesario escenarios muestrales estables, por tanto consideraremos como nulos aquellos ensayos en los que exista viento racheado. De este modo clasificaremos los vientos en 4 tipos dependiendo de su velocidad.

- **Leve:** cuando la velocidad media del viento no supera los 2 m/s
- **Moderado:** cuando la velocidad media del viento supera los 2m/s pero no sobrepasa la velocidad de 4 m/s
- **Fuerte:** la velocidad del viento sobrepasa los 4 m/s
- **Racheado:** la desviación típica de la media de velocidad de viento durante el ensayo es mayor de  $20^\circ$  y su velocidad media supera los 4 m/s.

Dentro y en cada uno de los tipos de velocidades de viento, se incluirá la variable "Dirección del viento" (DV) que es la dirección de ataque del viento respecto a las líneas de aspersión que conforman los marcos posteriormente simulados con la ayuda del programa "*SpacePro*" en el cual podremos modificar el ángulo de entrada del viento. Tomando como referencia la Figura 1, se pueden considerar tres tipos de direcciones:

- Viento **paralelo** a la línea de aspersión: vector de velocidad media del viento forma ángulo cero respecto a la línea de cultivo, con una desviación típica no mayor de  $20^\circ$ .
- Viento **oblicuo** a la línea de aspersión: vector de velocidad media del viento durante el ensayo forma un ángulo de 45 grados respecto a la línea de aspersión, con una variabilidad de  $20^\circ$ .
- Viento **perpendicular** a la línea de aspersión: vector de velocidad media del viento perpendicular a la línea de aspersión, con una variabilidad de  $20^\circ$ .

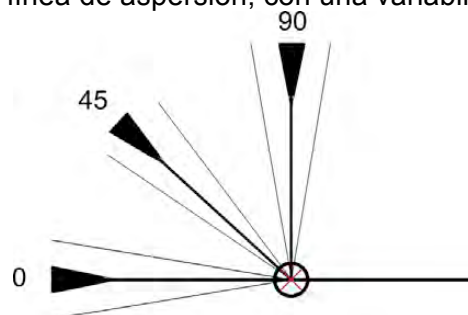


Figura 1: Representación gráfica de las direcciones descritas

La captación de los datos de pluviometría se realiza mediante una matriz pluviométrica. Nos dará la distribución espacial de los mm/h. Los datos medidos se acumulan en un datalogger para su posterior procesado. Se procede a la recogida de los datos a través de un programa informático compatible.

Recogidos los datos se procede a su análisis. Obtenemos una distribución pluviométrica media para cada episodio Viento, del aspersor aislado.

La figura nº2 Muestra distribución de la pluviometría a partir de datos de la matriz de pluviométrica, para el aspersor ensayado con unas condiciones de viento concretas.

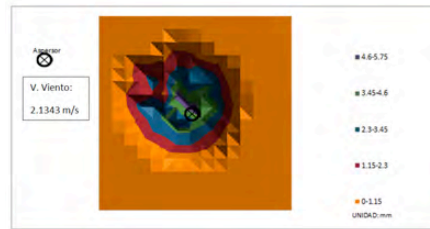


Figura nº 2: Distribución de la pluviometría.

Establecido el comportamiento del aspersor aislado, introducimos la variable marco. Procesaremos los datos obtenidos en cada uno de los ensayos a través del “SpacePro” para obtener los resultados de cada tipo de marco y dimensiones de este. Para la obtención de los resultados de este proyecto introduciremos en el “SpacePro” la variante de marco rectangular y marco triangular con dimensiones de 10x10 hasta 18x18 para ambos tipos de marco. De esta forma logramos saber cuáles son las uniformidades de distribución (DU) para cada boquilla y presión que se ha ensayado.

Extrapolamos matemáticamente mediante el programa informático “SpacePro” el comportamiento de cada marco para viento perpendicular, paralelo y oblicuo. Obtenemos la uniformidad de distribución de lluvia para la situación ensayada.

Para las evaluaciones de los ensayos de riego se utilizó la metodología propuesta por el Sistema de Asistencia al Regante de Andalucía del IFAPA (Salvatierra, 2012). El índice utilizado para caracterizar la uniformidad de las instalaciones en esta metodología es la Uniformidad de Distribución, UD. Se puede obtener el coeficiente de uniformidad de Christiansen a través de la fórmula:

$$CUC = ((1 - 0.63 * (1 - UD/100)) * 100) \quad (\text{Merriam y Keller, 1978}).$$

La uniformidad de distribución (UD) se define como la relación entre la medida de mínima altura interceptada y la altura media interceptada.

Hay que tener en cuenta que optando por una uniformidad alta, se estará eligiendo una instalación de riego que ahorrará agua e incrementará la producción de los cultivos, lo que siempre es necesario. Pero también será mayor el coste de la instalación ya que las presiones deberán ser más uniformes, mayores los diámetros de tuberías, se necesitará mayor longitud de tubería, serán necesarios reguladores de presión, etc.

Así pues, habrá que llegar a un equilibrio, eligiendo una uniformidad lo suficientemente elevada que permita aprovechar el agua al tiempo que se obtienen buenas producciones, sin que el coste sea excesivo. En cualquier caso, la uniformidad de distribución deberá ser mayor o igual que el 75% (tabla 2).

Para abordar el análisis de los datos vamos a generar graficas que muestren el alcance de la uniformidad de distribución respecto a las distintas disposiciones de marco, fijando en cada caso las variables que correspondan.

Con objeto de extraer más fácilmente las conclusiones de los datos, se mantienen aquellas situaciones de marco y dirección de viento que reflejan el mismo caso. Es decir, la situación de marco 10x12 con dirección viento oblicuo respecto a las líneas de aspersión es la misma que marco 12x10 con viento oblicuo respecto a las líneas de aspersión. Igualmente la situación 12x10 con viento paralelo respecto a las líneas de aspersión es la misma que con marco 10x12 con viento perpendicular respecto a las líneas de aspersión

### 3- Resultados.

Debido a la gran cantidad de datos obtenidos y las múltiples combinaciones posibles que se pueden realizar, nos centraremos en procesar y analizar unos estudios en concreto. Para todos estos estudios hemos mantenido la presión como una constante, tomando como

referencia una presión de 3,5 bar, exceptuando para el estudio 3 que se tomó una presión de 3,0 bar. Esta elección se ha tomado como consecuencia de que la gran mayoría de los riegos por aspersión en el bajo Guadalquivir varían entre los 3,0 bar y 3,5 bar. Los estudios que hemos realizado son los siguientes:

- Estudio 1, Influencia de la dirección del viento: Variación de la UD respecto a las distintas disposiciones de marco para un ataque del viento paralelo, oblicuo y perpendicular. Variables fijadas: presión 3.5 bar y marco rectangular.
- Estudio 2, Influencia de la disposición del marco en cobertura superficial: Variación de la UD respecto a las distintas disposiciones de marcos pequeños según sea el marco rectangular o triangular. Variables fijadas: presión 3.5 bar y viento perpendicular.
- Estudio 3, Influencia de la disposición del marco en cobertura enterrada: Variación de la UD respecto a las distintas disposiciones de marco grandes según sea el marco rectangular o triangular. Variables fijadas: presión 3.0 bar y viento perpendicular.
- Estudio 4, Influencia de la velocidad del viento: Comparativa de la UD para viento fuerte y leve. Variables fijadas: viento oblicuo, marco rectangular y boquilla 5/32 VP.

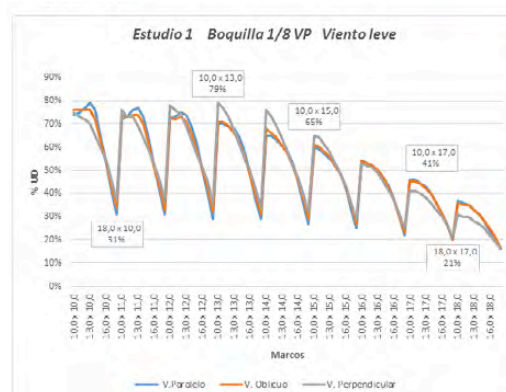
Para abordar el análisis de los datos vamos a generar graficas que muestren el alcance de la uniformidad de distribución respecto a las distintas disposiciones de marco, fijando en cada caso las variables que correspondan.

Con objeto de extraer más fácilmente las conclusiones de los datos, se mantienen aquellas situaciones de marco y dirección de viento que reflejan el mismo caso. Es decir, la situación de marco 10x12 con dirección viento oblicuo respecto a las líneas de aspersión es la misma que marco 12x10 con viento oblicuo respecto a las líneas de aspersión. Igualmente la situación 12x10 con viento paralelo respecto a las líneas de aspersión es la misma que con marco 10x12 con viento perpendicular respecto a las líneas de aspersión.

### 3.1. Estudio 1, Influencia de la dirección del viento

El objetivo de este estudio es comparar y analizar como varía la uniformidad de distribución respecto a las distintas disposiciones de marco cuando el ataque del viento es paralelo, oblicuo o perpendicular. Usaremos para el estudio tres combinaciones diferentes de boquillas: la boquilla 1/8 con vaina prolongadora, la boquilla 1/8 con vaina prolongadora más boquilla secundaria 3/32 y la boquilla 5/32 con vaina prolongadora. Las variables que fijaremos serán la presión de trabajo que será de 3,5 bar y el tipo de marco que será rectangular.

#### ➤ Boquilla 1/8" VP



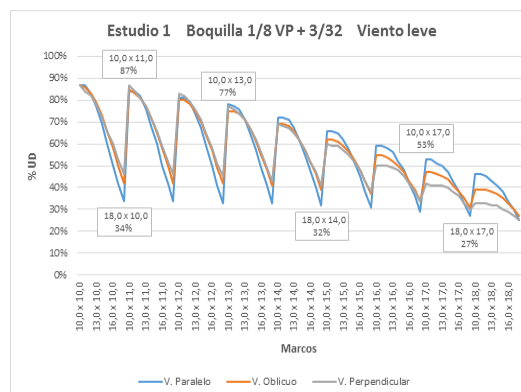
Gráfica 1: Gráfica lineal del porcentaje de uniformidad de distribución (UD) en diferentes tamaños de marco con tres tipos de dirección de ataque del viento: paralelo (a), oblicuo (b) y perpendicular (c) a las líneas de aspersión.

La uniformidad de distribución (UD) disminuye al aumentar el marco, y simultáneamente, cuanto más desproporcionado sea el rectángulo del marco (los dos lados de dimensiones muy desiguales (ejemplo: 18x10)) más drásticamente decrece la UD.

Se obtiene un mejor comportamiento con vientos perpendiculares en situaciones de marcos rectangulares moderados (dimensiones parecidas entre los dos lados) hasta valores de 15 en el lado de máxima longitud (ejemplo: 10x13).

En las direcciones de viento oblicuo y perpendicular se observa un comportamiento similar entre ellos, obteniendo valores inferiores a la dirección de viento perpendicular, exceptuando en marcos rectangulares desproporcionados con valores superiores al 16 en el lado de máxima longitud (ejemplo: 10x17).

➤ Boquilla 1/8" VP + 3/32"

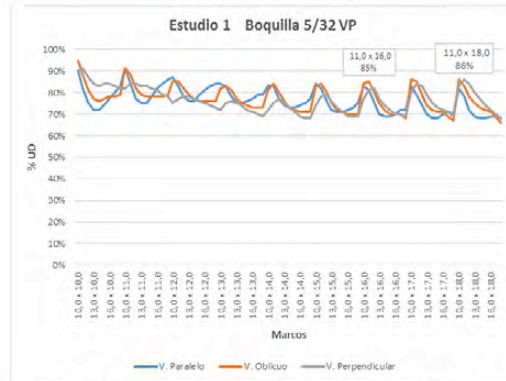


Gráfica 2: Gráfica lineal del porcentaje de uniformidad de distribución (UD) en diferentes tamaños de marco con tres tipos de dirección de ataque del viento: paralelo (a), oblicuo (b) y perpendicular (c) a las líneas de aspersión.

Se observa, al igual que ocurría en el caso anterior, como la uniformidad de distribución (UD) decrece al aumentar las dimensiones del marco, así como cuanto más desproporcionado sea el rectángulo del marco.

Se aprecia cómo los 3 tipos de dirección de ataque del viento tienen un comportamiento parecido, obteniéndose sus valores máximos de UD en marcos rectangulares moderados, donde el valor de uno de sus lados es 10 y el otro lado no sobrepasa el valor de 13 (ejemplo: 10x11). Sin embargo se distingue como a partir de valores superiores al 13 en el lado mayor del rectángulo, el valor de UD para viento perpendicular es inferior respecto al viento oblicuo, y éste a su vez es inferior respecto al viento paralelo (ejemplo: 10x17).

➤ Boquilla 5/32 VP



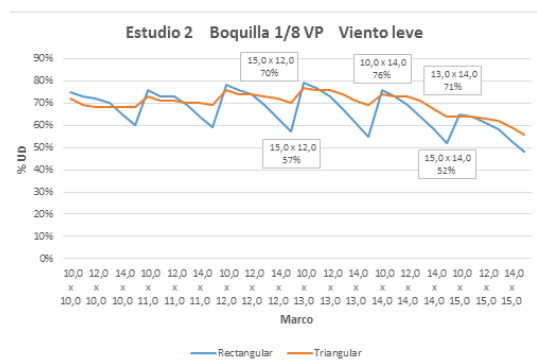
Gráfica 3: Gráfica lineal del porcentaje de uniformidad de distribución (UD) en diferentes tamaños de marco con tres tipos de dirección de ataque del viento: paralelo (a), oblicuo (b) y perpendicular (c) a las líneas de aspersión.

A diferencia con los dos casos anteriores, se aprecia como la disminución de la UD es inferior al aumentar el tamaño del marco, manteniéndose los valores de UD entre 65% y 90% en los 3 vientos.

3.2. Estudio 2, Influencia de la disposición del marco en cobertura superficial.

La finalidad de este estudio es comparar y analizar como varía la uniformidad de distribución según sea rectangular o triangular el marco, para marcos de menos de 15x15. Usaremos para el estudio tres combinaciones diferentes de boquillas: la boquilla 1/8 con vaina prolongadora, la boquilla 1/8 con vaina prolongadora más boquilla secundaria 3/32 y la boquilla 5/32 con vaina prolongadora. Las variables que fijaremos serán la presión de trabajo que será de 3,5 bar y la dirección de ataque del viento que será perpendicular.

➤ Boquilla 1/8 VP



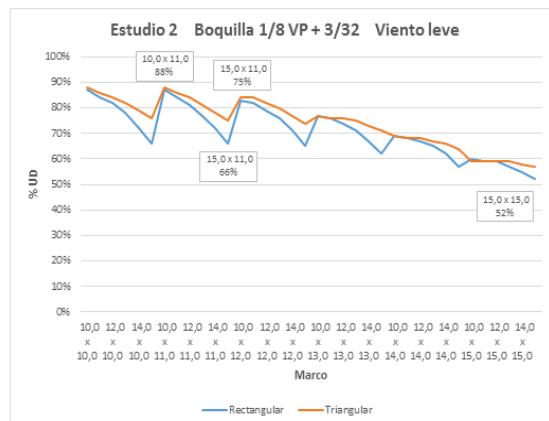
Gráfica 4: Gráfica lineal del porcentaje de uniformidad de distribución (UD) en diferentes tamaños de marco con dos tipos de dimensiones de marco: rectangular y triangular.

Se aprecia claramente como los valores de UD se mantienen más constantes, valores entre el 70-80%, cuando el marco es triangular. No obstante, se observa como los valores de la uniformidad de distribución para marcos triangulares decrecen rápidamente, hasta valores inferiores al 60%, conforme las dimensiones del marco aumentan a partir de marcos de 13x14.

Se observa la disminución de los valores de UD, para marcos rectangulares, cuando aumentan el tamaño de los marcos y conforme crecen las dimensiones de sus lados.



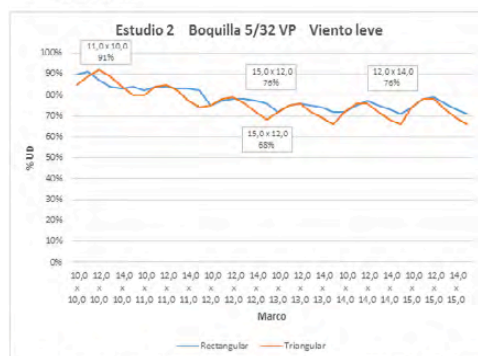
➤ Boquilla 1/8 VP + 3/32



Gráfica 5: Gráfica lineal del porcentaje de uniformidad de distribución (UD) en diferentes tamaños de marco con dos tipos de dimensiones de marco: rectangular y triangular.

Se observa la disminución de los valores de UD según aumentan el tamaño de los marcos y conforme crecen las dimensiones de sus lados. Los valores de uniformidad de distribución disminuyen de forma similar tanto para marcos rectangulares como triangulares. Sin embargo, en marcos rectangulares este decrecimiento es más acentuado conforme aumenta el tamaño de uno de sus lados (ejemplo 15x11).

➤ Boquilla 5/32 VP



Gráfica 6: Gráfica lineal del porcentaje de uniformidad de distribución (UD) en diferentes tamaños de marco con dos tipos de dimensiones de marco: rectangular y triangular.

Se aprecia como los valores de uniformidad de distribución van disminuyendo según aumentan el tamaño de los marcos y conforme crecen las dimensiones de sus lados, aunque esta disminución es menos severa que la ocurrida en el caso de la boquilla 1/8 VP+3/32.

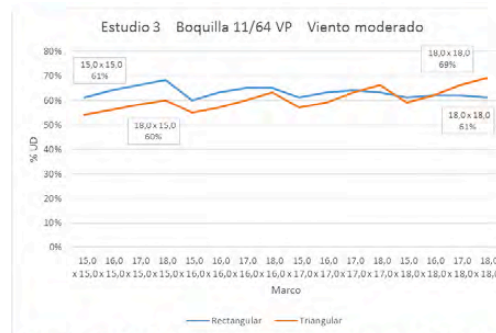
Los valores de UD disminuyen de forma similar tanto para marcos rectangulares como triangulares. Sin embargo, en marcos triangulares este decrecimiento es más acentuado conforme aumenta el tamaño de uno de sus lados (ejemplo 15x12) a diferencia de lo que ocurría en el caso de la boquilla 1/8 VP+3/32, donde era el marco rectangulares el que acusaba más este decrecimiento de los valores de UD.

### 3.3. Estudio 3, Influencia de la disposición del marco en cobertura enterrada.

La finalidad de este estudio es comparar y analizar como varía la uniformidad de distribución según sea rectangular o triangular el marco, para marcos mayores de 15x15. Usaremos para el estudio dos combinaciones diferentes de boquillas: la boquilla 11/64 con vaina prolongadora y la boquilla 3/16 con vaina prolongadora. Las variables que fijaremos serán la

presión de trabajo que será de 3,0 bar y la dirección de ataque del viento que será perpendicular.

➤ Boquilla 11/64



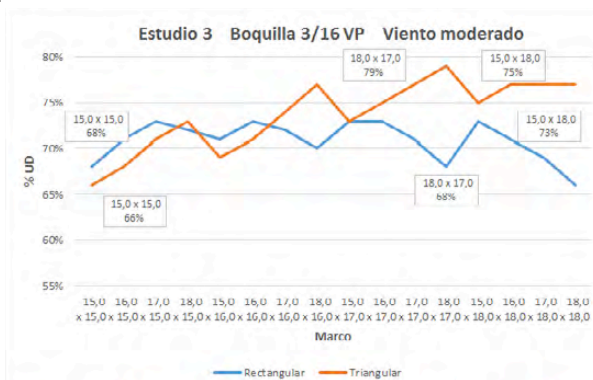
Gráfica 7: Gráfica lineal del porcentaje de uniformidad de distribución (UD) en diferentes tamaños de marco con dos tipos de dimensiones de marco: rectangular y triangular.

Se aprecia, en líneas generales, un mejor comportamiento de los valores de uniformidad de distribución en marcos rectangulares, exceptuando cuando ambos lados del marco son iguales o superiores a un valor de 17 (ejemplo 18x18)

Para marcos rectangulares los valores de UD se mantiene constantes conforme aumenta las dimensiones del marco, como se puede observar en los marcos 15x15 y 18x18 cuyos valores de UD son los mismos.

En marcos triangulares los valores de UD crecen según aumentan las dimensiones del marco, y simultáneamente al crecer el tamaño de uno de sus lados (ejemplo 18x15), alcanzando su máximo valor de UD en marco 18x18.

➤ Boquilla 3/16 VP



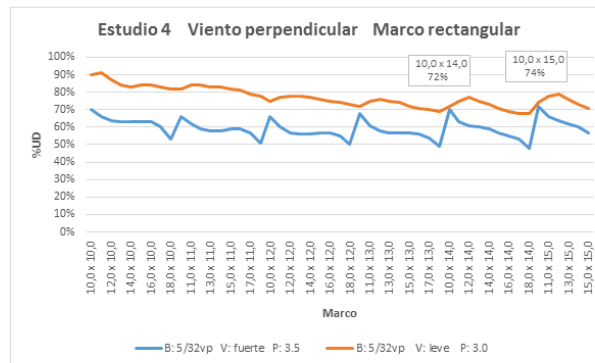
Gráfica 8: Gráfica lineal del porcentaje de uniformidad de distribución (UD) en diferentes tamaños de marco con dos tipos de dimensiones de marco: rectangular y triangular.

Se observa como para marcos triangulares los valores de uniformidad de distribución crecen al aumentar las dimensiones del marco y simultáneamente al crecer el tamaño de uno de sus lados. En marcos rectangulares se aprecia como los valores de UD se mantienen semejantes siempre que al menos uno de sus lados se mantenga en valores de 15. Estos valores disminuyen según aumenta el tamaño de uno de sus lados.

Como consecuencia de lo explicado en el apartado anterior, se puede observar en la gráfica como se obtienen mejores valores de UD para marcos triangulares exceptuando cuando las dimensiones del marco son mínimas (ejemplo 15x15) y valores similares, tanto en marco triangular como rectangular, cuando la dimensión de uno de sus lados es mínima (ejemplo 15x18).

### 3.4. Estudio 4, Influencia de la velocidad del viento.

En este estudio pretendemos ver las fortalezas de una boquilla en dos situaciones de velocidad de viento. Para ello se fijan aquellas variables que aseguran un mejor funcionamiento para diferentes velocidades de viento, dichas condiciones están justificadas en ensayos de campos ya realizados por el SAR (Salvatierra, 2012). Según dichas condiciones para un viento fuerte se recomienda una presión de trabajo de 3,0 bar con objeto de aumentar el tamaño de gota y para un viento leve se fija la presión de trabajo a 3,5 bar con objeto de asegurar la presión nominal de funcionamiento del aspersor.



Gráfica 9: Gráfica lineal del porcentaje de uniformidad de distribución (UD) en diferentes tamaños de marco con dos tipos de velocidad de viento y presión de trabajo.

En condiciones de viento leve y presión de 3,5 bar se observa como la uniformidad de distribución decrece levemente conforme aumenta las dimensiones del marco y conforme crece la longitud de uno de sus lados.

En condiciones de viento fuerte y presión de 3,0 bar se observa como en ningún caso se obtienen valores de UD que lleguen al 75%.

Se aprecia como en marcos tipo 10x14 o 10x15 se alcanza una UD cercana al 75%, pero estos marcos son poco frecuentes y no atienden a una configuración estándar.

Para solucionar esta baja uniformidad de distribución habría q regar con poco viento o probar con una boquilla diferente.

## 4- Conclusiones

De este proyecto obtenemos en claro, lo útil y eficaz que es el banco de aspersión automatizado, el cual se convierte en una herramienta muy eficiente para solucionar el problema de la uniformidad en los sistemas de riego por aspersión.

Debido al ingente volumen de resultados que se obtienen de los ensayos realizados sería necesario diseñar una herramienta informática de consulta o un sistema experto, que con estos datos buscarse la mejor solución a problemas particulares. De esta forma se podrían mejorar los recursos energéticos, utilizando los resultados obtenidos en el banco de ensayos para un funcionamiento aceptable del aspersor con presiones bajas de trabajo.

De los estudios presentados, se pueden obtener algunas conclusiones interesantes respecto a la eficiencia de aplicación del agua y uniformidad de riego bajo condiciones de viento cuando se emplea riego por aspersión. Estas conclusiones se afirman con los ensayos realizados hasta el momento, no se aseguran que con una casuística mayor se mantengan. Por tanto, y dada la eficiencia del sistema, interesaría seguir ensayando para la obtención de una volumen mayor de datos. Como resumen de todas las situaciones contempladas en el presente estudio, se ha observado que:



La uniformidad de distribución mejora usando aspersores con dos boquillas respecto al uso de una sola boquilla.

La UD desciende más acusadamente al aumentar la velocidad del viento en marcos amplios respecto a separaciones menores

En aspersores con dos boquillas, los marcos cuadrados presentan mayor UD que los marcos rectangulares

Los marcos triangulares tienen mayor UD respecto a los marcos rectangulares

Dichas conclusiones coinciden y complementan lo expuesto por Tarjuelo Martín, Benito (1992)

## 5-Bibliografía

**CAMPBELL SCIENTIFIC (1995):** *CR1000 Measurement and Control Modile. Instruction manual.* Campbell Scientific. Inc. Leicester. UK.

**DE JUAN, J. TARJUELO, J. VALIENTE, M. GARCIA, P. (1994):** *Non-uniformity and management of sprinkler irrigation systems.* Proceedings of the third congress of the European Society for Agronomy, Padova University, Abano-Padova, Italy, 18-22 September 1994.; 1994. 102-103. 3 ref.

**ESTUDILLO CASTRO, FRANCISCO (2013):** Diseño de un banco de ensayos experimental automatizado para el análisis de los efectos de la dirección de ataque del viento.

**FERNÁNDEZ GÓMEZ, RAFAEL (2010):** Manual de riego para agricultores: modulo 3. Riego por aspersión.

**ISO 7749-1:1986,** Equipos de riego-Aspersores rotativos-Parte 1: Diseño y exigencias de funcionamiento.

**ISO 7749-2:1990,** Equipo de riego - Aspersores Rotativos - Parte 2: Uniformidad de distribución y métodos de prueba.

**MERRIAN, J.L. y KELLER, J. (1978):** *Farm irrigation system evaluation: a guide for management.* UTAH State University. Logan. Utah. USA

**SALVATIERRA, B. (2010):** Uniformidad de riego en las instalaciones de riego. Boletín trimestral SAR. Nº 14. Enero, marzo 2010.

**SÁNCHEZ, I. FACI, J. M. ZAPATA, N. (2011):** *The effects of pressure, nozzle diameter and meteorological conditions on the performance of agricultural impact sprinklers.* Agricultural Water Management; 2011. 102: 1, 13-24.

**SEGINER, I. NIR, D. and BERNUTH, R. (1991):** *Simulation of wind-distorted sprinkler patterns.* J. Irrig. Drain Eng., 117(2), 285–306

**TARJUELO, J. M. CARRION, P. VALIENTE, M. (1994):** *Simulation of irrigation distribution by sprinkler under windy conditions.* Investigacion Agraria, Produccion y Proteccion Vegetales; 1994. 9: 2, 255-272. 15 ref.

**TARJUELO MARTÍN BENITO, J. M. (1992):** *El riego por aspersión: diseño y funcionamiento.* Albacete: Caja de Albacete; [Toledo]: Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha, D.L.

**TARJUELO MARTÍN BENITO, J. M. (2005):** *El riego por aspersión y su tecnología.* Ediciones MundiPrensa. 581 pp.

**VORIES, E. y VON BERNUTH, R. (1986):** *Single nozzle sprinkler performance in wind.* Transactions of the ASAE, vol. 29 (5): 1325,1330.

**ZAPATA, N. PLAYAN, E. MARTINEZ-COB, A. SANCHEZ, I. FACI, J. M. LECINA, S. (2008):** *From on-farm solid-set sprinkler irrigation design to collective irrigation network design in windy areas.* Agricultural Water Management; 2007. 87: 2, 187-199. 37 ref.



## SISTEMA DE RIEGO DE BAJO COSTE CON MICROTUBOS. DISEÑO Y EVALUACIÓN

*Sáenz Pisaca, D. (1); Marzol Jaén, M<sup>a</sup> Victoria. (2); Reguengo Álvarez, I. (3)*

<sup>1</sup> Profesor, Universidad de La Laguna, Departamento de Ingeniería Agraria, Náutica, Civil y Marítima, [dsaenzpi@ull.edu.es](mailto:dsaenzpi@ull.edu.es)

<sup>2</sup> Profesora, Universidad de La Laguna, Departamento de Geografía e Historia, [mmarzol@ull.edu.es](mailto:mmarzol@ull.edu.es)

<sup>3</sup> Ingeniero Técnico Agrícola, [israelreguengo@gmail.com](mailto:israelreguengo@gmail.com)

### 1 Resumen

En esta comunicación se presenta la experiencia adquirida en el diseño de una instalación de riego de bajo coste en el que el emisor elegido fue el microtubo, que tiene un aceptable comportamiento hidráulico, es económico y de fácil instalación. Se determinan en laboratorio los parámetros hidráulicos del emisor, de las tuberías y de los accesorios. Se realiza un diseño inicial que se va optimizando después de las evaluaciones realizadas en campo. La superficie que puede regar el sistema propuesto es de 400 m<sup>2</sup> y su costo de aproximadamente 0,16 € por emisor. Se plantea la posibilidad de utilizar tuberías procedentes de material de riego reciclado. También se aborda la implementación del sistema de riego con un equipo de bombeo solar para el llenado de los depósitos. Se concluye con que la viabilidad del diseño propuesto estará condicionada a la disponibilidad de los materiales necesarios en el lugar donde se instale.

### 2 Introducción

Una gran parte de la población de los países en vías de desarrollo, unos 800 millones, padecen desnutrición crónica (FAO, 2014). En estas condiciones, la necesidad de garantizar los requerimientos básicos de la población se hace indispensable.

Los esfuerzos para conseguir una seguridad alimentaria pasan por el aumento de su productividad agraria. Esta estrategia se ve aún más justificada cuando en algunos países, cada 15 años, se reduce a la mitad el tamaño medio de las parcelas agrícolas debido al rápido crecimiento de su población (Postel et al., 2001).

El acceso de comunidades pobres al agua de riego y la posibilidad de utilizar ese agua para aumentar la productividad de sus cultivos es la vía que permitiría aumentar sus ingresos económicos y garantizar su autonomía alimentaria. En regiones con largas temporadas secas, las parcelas en regadío llegan a duplicar la producción anual respecto a las de secano (Postel et al., 2001).

La implantación del riego por goteo en muchos de estos lugares ha aumentado aún más la productividad agrícola. Ésta es una de las razones por las que en las dos últimas décadas del siglo pasado la superficie mundial bajo este tipo de riego se multiplicó por cincuenta, aunque dicha superficie al final de ese período solo significaba el 1% de la total de regadío.

Los sistemas de riego por goteo convencionales se han mostrado inadecuados para adaptarse a las condiciones de muchas regiones del globo donde las pequeñas dimensiones

de las explotaciones agrarias, la pobreza de la población y su escasa formación técnica, hacen inviables estas instalaciones.

Los elevados requerimientos energéticos, el excesivo coste, y la complejidad de manejo y mantenimiento de los sistemas de riego por goteo convencionales, han hecho decidirse a Organizaciones No Gubernamentales e Institutos Tecnológicos a desarrollar sistemas de goteo de pequeña dimensión adaptados a las condiciones de muchos países de Asia, África y América Latina. Un ejemplo lo constituye la ONG "International Development Enterprises" (IDE) que lleva varias décadas trabajando en el diseño, producción y distribución de tecnología de riego de bajo coste para las comunidades agrarias desfavorecidas.

El objetivo de la experiencia que se expone en esta comunicación es el diseñar una instalación de riego de bajo coste que permita regar eficientemente un huerto de proporciones tales que garantice la seguridad alimentaria de una pequeña comunidad rural.

### **3 Diseño, evaluación y mejora de un sistema de riego de bajo coste**

#### **3.1 Diseño del sistema de bajo coste**

La primera aproximación de los autores de esta comunicación al estudio de los riegos de bajo coste fue a través de la realización y dirección del trabajo fin de carrera de Ingeniería Técnica Agrícola titulado "Diseño de una Instalación de Riego Localizado de bajo coste, utilizando tuberías fabricadas con material reutilizado". Además del diseño de una instalación que permitía regar una parcela de 430 m<sup>2</sup> con unos componentes muy económicos, se estudió la posibilidad de utilizar las tuberías de polietileno desechadas en explotaciones agrarias de la Isla de Tenerife para volver a fabricar nuevas tuberías. Esta propuesta tenía dos objetivos, contribuir a resolver un problema medioambiental, eliminando los residuos de tuberías abandonadas y diseminadas por las áreas rurales de la geografía insular y utilizar las nuevas tuberías como un componente de los sistemas de riego estudiados.

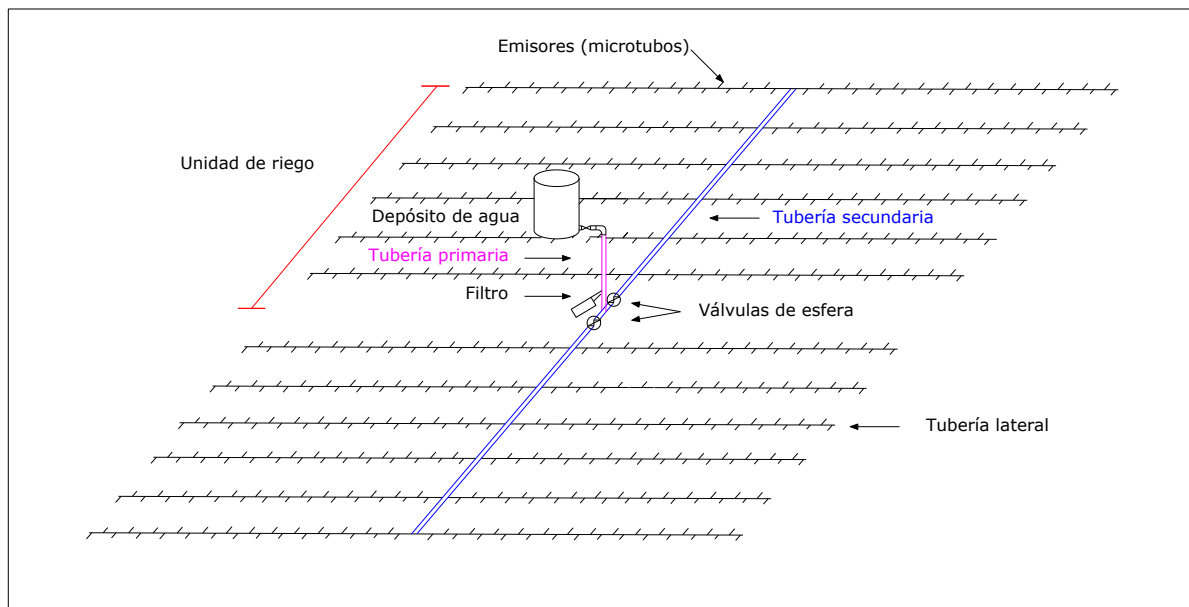
En una experiencia piloto se recolectaron las tuberías desechadas procedentes de tres fincas del Sur de Tenerife, se trocearon, se lavaron y se fabricaron nuevas tuberías. Se realizaron ensayos para comprobar su calidad. El de resistencia a la presión hidráulica interna se llevó a cabo en el laboratorio de la E.T.S.I.A. de La Laguna sometiendo a tres probetas de cada finca a una presión hidráulica de 5,5 bar (550 kPa) durante tres horas sin detectar pérdidas ni deformaciones. No obstante, hay que considerar que de ser utilizadas en estos sistemas de riego, estarían sometidas a cargas hidráulicas muy bajas.

En el Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario y Alimentario (I.M.I.D.A) se realizaron los siguientes ensayos: Control dimensional: UNE 53367 (00), Negro de Carbono: UNE 53375 (83), Grado de dispersión del Negro de Carbono: UNE 53131 (90), Resistencia al Alargamiento a la Rotura: UNE EN ISO 6259 (97), Comportamiento al Calor: UNE 53131 (90), Resistencia al Cuarteamiento por tensiones en medio activo: UNE 53367 (00). Analizando los resultados, todas las tuberías objeto del ensayo cumplieron con las prescripciones de las normas mencionadas, a excepción del material proveniente de una de las fincas que tenía un contenido en Negro de Humo ligeramente por debajo del mínimo exigido ( $1,70\% < 2-2,5\%$ ).

Por todo ello se concluyó que estas tuberías podrían ser consideradas aptas para su utilización en instalaciones de riego de bajo coste.

Los componentes del primer diseño estudiado consistían en un depósito de PVC con tapa de 1000 l de capacidad, una estructura de 2 m de altura compuesta por capas sucesivas de palets de madera y bloques huecos de hormigón, un filtro de malla plástico  $\phi$  1¼", dos válvulas de esfera, tubería principal y secundaria de PEBD 32mm-0,4 MPa, tuberías laterales de PEBD 16 mm-0,25 MPa y microtubos de 30 cm, de diámetro interno 1,5 mm.



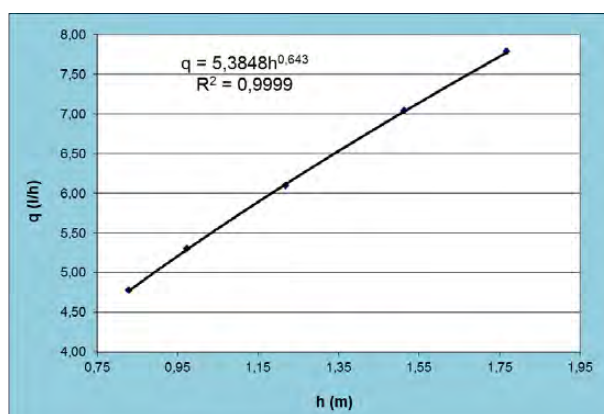


**Figura 1.** Croquis de la instalación.

Las pruebas realizadas para conocer el funcionamiento hidráulico de la instalación se realizaron en el laboratorio de hidráulica de la ETSIA de La Laguna. Para ello se instalaron dos piezómetros de 3 m de altura que permitían apreciar una variación de 2 mm de columna de agua. La determinación del Coeficiente de Variación de caudales (CV) se realizó con 25 emisores trabajando con una altura de presión de 1 m (presión media aproximada de trabajo). Este coeficiente integra la variación de la longitud del microtubo debido a la imprecisión en el corte y la propia variación de fabricación del mismo (ovalización y variación del diámetro interior). El primer coeficiente resultó 0,007 (0,7%) mientras que el global fue de 0,028 (2,8%). Este resultado le confiere la categoría A, según la norma ISO 9261, y excelente según la norma ASAE EP.405.1 del US Soil Conservation Service.



**Foto 2.** Ensayo para la determinación del Coeficiente de Variación de caudal de los microtubos.



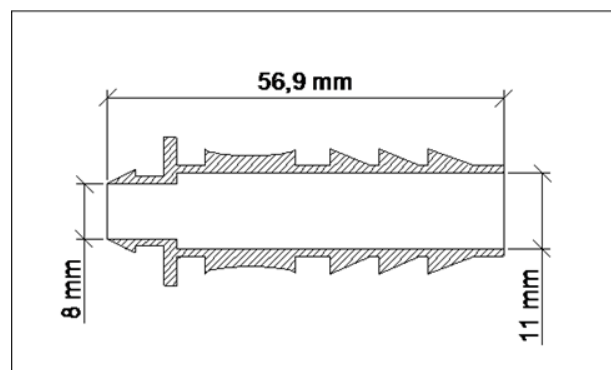
**Figura 2.** Curva caudal (q)-altura de presión (h) del microtubo ( $D_i=1,5$  mm,  $l=30$  cm).

La curva caudal-presión se determinó con alturas comprendidas entre 0,83 y 1,77 m. El exponente de descarga obtenido (0,643) es aceptable para el fin al que se le destina, y se

encuentra dentro del intervalo de valores citados por Rodrigo (1997). El caudal resultaría muy alto (23,66 l/h) si trabajáramos con presiones normales para riego localizado (100 kPa≈10 mca), pero moderado si la presión de trabajo se sitúa en torno a 1mca (5,38 l/h).

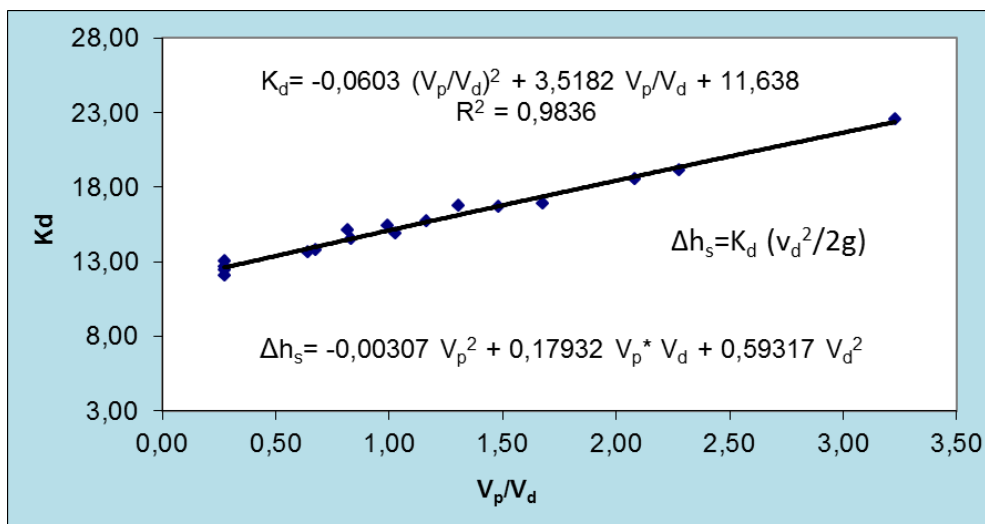
La pérdida de carga en conexión de los microtubos se determinó insertando diez de ellos 2 cm en un tramo de tubería de PEBD 16 (13,6) de 2 m de longitud (distancia entre tomas piezométricas). Circulando un caudal estimado al medio de un lateral, se midió la diferencia de altura entre ambos piezómetros con la tubería lisa (sin microtubos) y con los microtubos insertados y previamente doblados en sus extremos para anular las descargas. La pérdida de carga obtenida de cada conexión fue de 0,17 metros de longitud equivalente (mle) de tubería.

El mismo procedimiento se siguió para determinar las pérdidas de carga de las conexiones de los laterales a lo largo de una tubería principal de PEBD 32 (28,0), resultando 0,48 mle.



**Foto 3.** Acometidas insertadas en la tubería. **Figura 3.** Sección acotada de la acometida.

Por último se determinó la expresión de pérdida de carga en la derivación del flujo desde la tubería secundaria ( $D_i=28$  mm) a la tubería lateral ( $D_i=13,6$  mm), siguiendo la metodología propuesta por De Paco (1992). Para ello se instalaron dos tomas piezométricas, una en la tubería principal, justo antes de introducirse el agua en el lateral y otra a su entrada. Se hicieron pasar diferentes caudales por ambas tuberías obteniendo un amplio número de combinaciones de velocidades  $V_p, V_d$ . Ajustados los valores de  $K_d$  a una ecuación polinómica de segundo grado se obtiene la ecuación para el cálculo de éste y de la pérdida de carga en la acometida ( $\Delta h_s$ ).



**Figura 4.** Coeficiente de pérdida de carga de la acometida del lateral de riego (Kd).

$v_p$  (m/s): velocidad en la tubería principal y  $v_d$  (m/s): velocidad en la derivación.

Con los resultados obtenidos se elaboró una hoja Excel para el cálculo del coeficiente de uniformidad de diseño (CU) adoptado por el Soil Conservation Service de USA y también por la American Society of Agricultural Engineers.

$$CU = 100 \cdot \left( \frac{1-1,27 \cdot CV}{\sqrt{e}} \right) \cdot \frac{q_n}{q_a} = 100 \cdot \left( \frac{1-1,27 \cdot CV}{\sqrt{e}} \right) \cdot \frac{k \cdot h_n^x}{k \cdot h_a^x} \quad (1)$$

La hoja calcula la presión mínima de la instalación ( $h_n$ ) y la presión media ( $h_a$ ). Se introducen los valores del coeficiente de variación del emisor (CV) y el número de emisores que dan agua a una misma planta (e). También han de incluirse la longitud del lateral y de la tubería secundaria, la separación entre emisores y laterales, así como la altura del depósito.

Al final del tanteo para conseguir un determinado CU, alcanzamos varias soluciones con distintas combinaciones de la longitud del lateral y la longitud de la tubería secundaria. Se escogerá la que resulte más económica si no existe otro condicionante.

Con los materiales escogidos, situando el depósito a una altura de 2,1 m, y separando los microtubos a 0,25 m y los laterales a 1,50 m, se obtuvieron las alternativas contempladas en la tabla 1, eligiendo la opción 3 y 8 para un CU del 80 y 90%, respectivamente.

**Tabla 1.** Resultados del dimensionamiento de la instalación con un coeficiente de uniformidad de diseño de 80 y 90%.

Opción	CU	Longitud de lateral (m)	Longitud de secundaria (m)	Superficie contando con una unidad operacional de riego (m <sup>2</sup> )	Superficie contando con dos unidades operacionales de riego (m <sup>2</sup> )
1	80%	9,25	12,00	222	444
2		10,50	10,50	220,5	441
<b>3</b>		<b>12,00</b>	<b>9,00</b>	<b>216</b>	<b>432</b>
4		14,00	7,50	210	420
5		16,50	6,00	198	396
6	90%	7,50	12,00	180	360
7		8,75	10,50	184	368
<b>8</b>		<b>10,25</b>	<b>9,00</b>	<b>189</b>	<b>378</b>
9		12,00	7,50	180	360
10		14,00	6,00	168	336

Para validar el diseño se montó una instalación en los campos experimentales de la ETSIA de La Laguna, realizando un cultivo asociado de hortalizas (calabazas, judías verdes, maíz, pimientos, tomates y lechugas).

Se determinó el Coeficiente de Uniformidad de aplicación siguiendo el protocolo propuesto por Merriam y Keller (1978). Para la instalación dimensionada con un CU de diseño del 80% se obtuvo un CU de aplicación del 83%. Para la de un CU de diseño del 90%, el CU de aplicación fue del 92%. Era de esperar que los CU de aplicación fueran algo

superior a los de diseño ya que, en pleno rigor, el  $h_n$  de la ecuación (1) debería corresponder a la presión media del 25% de los emisores de caudal más bajo y no a la presión mínima absoluta, que es con la que se trabaja en la hoja de cálculo.

También se instalaron piezómetros para medir las alturas de presión en distintas partes de la instalación como se puede observar en la foto 4.



**Foto 4.** Determinación del Coeficiente de Uniformidad de aplicación.

Se realizó una comparativa de los precios de los kits de riego de bajo coste existentes en el mercado en el año 2009. Los resultados se expresan en la tabla 2.

**Tabla 2.** Características y precios de los kits de riego de bajo coste.

Nombre del kit	Empresa	País (donde se comercializa)	Precio (\$)	nº de emisores	Coste/punto de emisión (\$)
Bucket kit	IDE*	varios	5	26	0,192
Family Nutrition kit (Bag)	IDE	India	5	33	0,150
Napalese System	IDE	Nepal	20	160	0,125
Bucket kit	Chapin Living Waters	varios	22,5	200	0,112
Drum kit	IDE	India	25	200	0,125
Family Drip System (sin depósito)	Netafim	varios	240	1500	0,160
Minitank (500 l)	IDE	Kenia	280	1600	0,175
RBC (ULL) (sin depósito)	ULL**	-	192	1152	0,166

\*IDE (International Development Enterprises).

\*\*ULL (Universidad de La Laguna).

### 3.2 Evaluación del sistema de bajo coste en la provincia de Saint Louis (Senegal)

En el año 2010 la Dirección General de Relaciones con África concedió la financiación del proyecto titulado “Evaluación de un sistema de Riego de Bajo Coste y capacitación agrícola de una Comunidad Rural desfavorecida en Senegal”. Este proyecto lo realizó la Universidad de La Laguna en colaboración con la Universidad Gaston Berger de Senegal. En noviembre de dicho año se seleccionaron las localidades para ubicar los kits de riego que iban a ser evaluados. Éstas fueron la Comunidad Rural de Khor (próxima a la ciudad de St. Louis), la Comunidad Rural de Minguenne, y los Campos Experimentales de la Universidad Gaston Berger (St. Louis). En las comunidades rurales mencionadas se constituyeron grupos de mujeres que iban a recibir una formación agraria, a instalar los equipos de riego y a llevar a cabo un cultivo de hortalizas. Se pretendía usar las instalaciones diseñadas para conocer sus fortalezas y debilidades en aquellas condiciones. Se plantaron nabos (*Raphanus sativus*), berengenas (*Solanum melongena*), berengenas africanas (*Solanum aethiopicum*) y pimientos picantes (*Capsicum anuum*).

De acuerdo con la especie cultivada se eligieron los marcos de plantación y, en consecuencia, se establecieron diferentes distanciamientos entre los microtubos y entre los laterales de riego. En el caso de las berengenas y pimientos se les asignó un emisor por planta y los microtubos se dispusieron alternativamente hacia un lado y otro del lateral regando líneas de plantas pareadas. En el caso de los nabos los microtubos se distribuyeron de la misma manera pero asignando un emisor para cada dos plantas, formando por tanto, cuatro líneas de plantación entre los pasillos.

Los cultivos se desarrollaron entre abril y julio de 2011. Las condiciones fueron de alta demanda evapotranspirativa y se estableció un intervalo de riego inicial de dos días, y cuando las plantas alcanzaron un moderado crecimiento se procedió al riego diario.

Se determinó el CU de aplicación cuando se montaron las instalaciones y al final de la campaña de cultivo, obteniendo en todos los casos los valores esperados (en torno al 85%).

De la experiencia realizada se obtuvieron las siguientes conclusiones:

Fortalezas del sistema de riego:

- Sencillez del montaje
- Facilidad de manejo
- Adecuada uniformidad de riego (la esperada en la fase de diseño)

Debilidades del sistema de riego:

- Sistema de sujeción del microtubo muy laborioso<sup>(1)</sup>
- Depósito inadecuado (proliferación de algas en su interior)<sup>(2)</sup>
- Estructura inadecuada (deterioro de los bloques prefabricados)<sup>(3)</sup>
- Sistema de llenado del depósito costoso<sup>(4)</sup>

(1) La fórmula empleada para sujetar el microtubo próximo al cuello de la planta fue propuesta por los agricultores. Consistió en la fabricación de una horquilla de alambre que se arrollaba al emisor y se clavaba en el suelo. Funcionó correctamente, aunque no deja de ser una solución laboriosa.

(2) Los depósitos utilizados fueron adquiridos en una industria azucarera situada a unas decenas de kilómetros de los huertos. Eran del tipo Ecobulk de 1000 l de capacidad que habían sido adquiridos por la compañía con materia prima y que, una vez vacíos, y ante su gran demanda, revendían a precios abusivos (100 €). Además, el



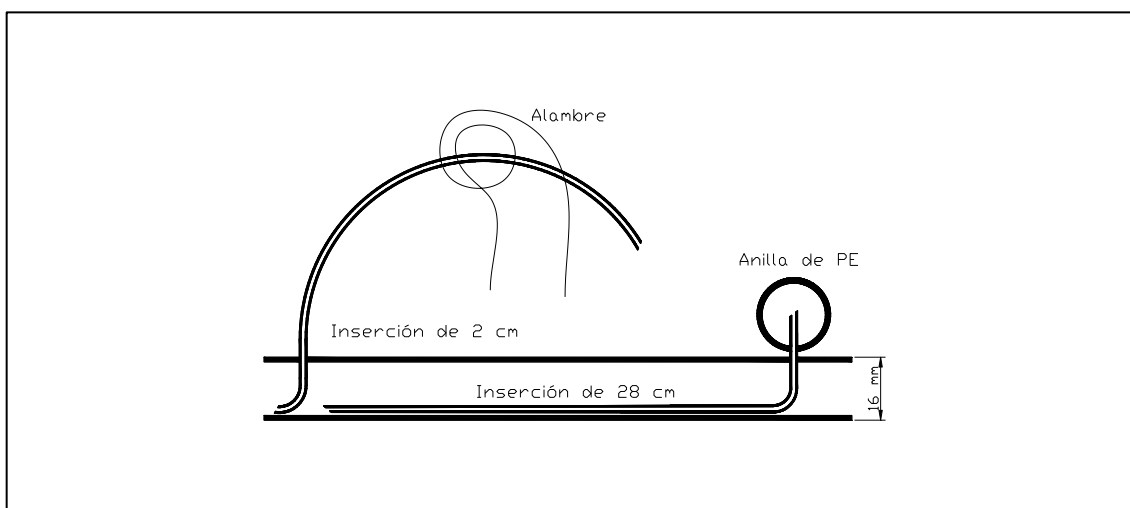
hecho de estar fabricados con polietileno blanco favorecía que la luz se trasluciera en su interior contribuyendo a la proliferación de algas.

- (3) Los bloques que se fabricaban en la zona eran de muy mala calidad, debido principalmente a la baja calidad de los áridos, deteriorándose rápidamente a la intemperie. En una de las instalaciones se tuvieron que sustituir por bloques nuevos que se fabricaron in situ.
- (4) A pesar de que en una de las comunidades se contó con una instalación solar para el bombeo del agua desde un reservorio próximo al huerto, ésta dejó de funcionar al cabo de dos meses debido a la baja calidad de la bomba utilizada y a la falta de protección eléctrica. Para el llenado de los depósitos de todas las instalaciones se adquirieron motobombas de gasolina que supusieron un costo de 200 € cada una.

### 3.3 Mejora del sistema y posterior evaluación

Para procurar soslayar los problemas de los sistemas evaluados en Senegal, se implementaron soluciones a los mismos. Las medidas correctoras se centraron en resolver las debilidades mencionadas en el apartado anterior.

En relación con el primer problema, se introdujo casi la totalidad del microtubo en la tubería lateral, dejando apenas 2 cm al exterior. Con ello, la emisión se producía sobre la tubería como si se tratase de un emisor estándar. Para evitar que el chorro de agua que éstos emitían se proyectara a una cierta distancia del lateral y con una trayectoria incontrolable, se insertó en su extremo una anilla de PE Ø 16mm que interceptaba el chorro. El problema que en principio podía plantear esta modificación era el aumento de la pérdida de carga en conexión de los aproximadamente 28 cm de microtubo que quedaban en el interior de la tubería. Después de realizar las pruebas en el laboratorio se comprobó que éstas aumentaban ligeramente, pasando de 0,17 mle de tubería lateral con una inserción de 2 cm, a 0,25 mle con una inserción de 28 cm.



**Figura 5.** Disposición inicial (inserción de 2 cm) y final (inserción de 28 cm).

En la evaluación del sistema mejorado que se realizó en los campos experimentales de la ETSIA de La Laguna se utilizó un depósito Ecobulk de color blanco como los utilizados en Senegal. Para evitar la proliferación de algas bastó con forrarlo con una malla negra tipo “antihierba”. Cuando no se disponga de depósitos de material opaco, ésta puede ser una solución efectiva porque además protege al material del envejecimiento que provocan las radiaciones ultravioletas del espectro solar.

Otra mejora que se llevó a cabo fue el diseño de una estructura metálica para elevar el depósito. Su cimentación está compuesta por cuatro dados de hormigón de 0,5 x 0,5 x 0,4



m que garantizan la estabilidad del sistema frente a vientos de 120 km/h con el depósito vacío (hipótesis más desfavorable). La estructura tipo mecano está formada por perfiles angulares de acero galvanizado de 40 x 4 mm. Las uniones están realizadas con tornillos pasantes de alta resistencia. El arriostramiento de la estructura se resuelve con cruces de San Andrés de alambre galvanizado  $\varnothing$  3,5 mm y sus correspondientes tensores. El costo del material necesario para la fabricación de la estructura (incluyendo el hormigón) es de aproximadamente 90 €.



**Foto 5.** Estructura de elevación del depósito.



**Foto 6.** Depósito cubierto con malla negra.



**Foto 7.** Detalle del punto de emisión.

La última mejora consistió en un sistema autónomo para la elevación del agua al depósito. El sistema está compuesto por un panel solar monocristalino de  $W_p=95$  W y  $V_{mp}=18$ V, estructura metálica para el soporte e inclinación del panel, bomba sumergible de corriente continua, sin escobillas, de 43,3 W (12V) capaz de elevar el agua hasta una altura máxima de 8 m, prefiltro de malla para alojar en su interior la bomba y dispositivo electrónico para la protección de la misma. Este último incluye un regulador de tensión a 12V y un comparador de doble ventana que tiene como misión desconectar el funcionamiento de la bomba cuando la tensión baje de 9V y vuelva a conectarla cuando la tensión alcance los 12V. Este sistema se encuentra en la actualidad en fase de prueba. El costo de todos los materiales descritos asciende aproximadamente a 350€.

#### 4 Conclusiones

El sistema de riego de bajo coste, diseñado en la ETSIA de La Laguna, tiene como objetivo conseguir regar una superficie lo suficientemente grande que logre garantizar la autonomía alimentaria de una pequeña comunidad de un país en vías de desarrollo. La sostenibilidad del sistema se sustenta en la sencillez de su diseño. Los emisores, en este caso microtubos, son muy baratos y los puede elaborar, instalar y mantener el propio agricultor. El resto del sistema puede ser también manejado y conservado fácilmente.

Con el correcto uso y diseño de la red de tuberías, la uniformidad de riego puede llegar a ser alta. Como todos los sistemas de riego de bajo coste, el consumo energético es reducido, ya que se requiere elevar el agua a muy poca altura.

Una labor que debería ser incentivada en los países desarrollados es la de reciclar las mangueras de riego para fabricar nuevas tuberías que pudieran formar parte de los sistemas de riego de bajo coste.



Debido al alto precio de los depósitos nuevos y al coste de su transporte, sería deseable que éstos fueran adquiridos en los países donde fueran a ser utilizados. Por el contrario, las tuberías y resto de accesorios podrían ser en un principio fabricados en países con un mayor desarrollo tecnológico y exportados a través de organizaciones sin ánimo de lucro. Para que estas iniciativas llegaran a tener el impacto deseado debería desarrollarse paralelamente un plan de formación de los agricultores que fueran a hacer uso de estas instalaciones.

Si en las fincas no se dispone de un suministro de agua por gravedad, su elevación para el llenado de los depósitos puede suponer que estas instalaciones de riego no resulten tan económicas.

En último término, debe ser el técnico que se encuentre a pie de campo quien valore la viabilidad del sistema y su optimización en cada caso.

## 5 Bibliografía

ASAE EP.405.1 (1999). Design and Installation of Microirrigation Systems Standards of ASAE, St. Joseph, Michigan.

De Paco, J.L. (1992). Fundamentos del cálculo hidráulico en los sistemas de riego y drenaje. Centro Nacional de Tecnología de Regadíos (CENTER). IRYDA. Mundi-prensa. 398 p.

FAO (United Nations Food and Agriculture Organization). (2014). The State of Food Insecurity in the World. Rome, Italy.

Merriam J.L. y Keller J. (1978). Farm irrigation system evaluation: a guide for management. Utah State University. Logan Utah. 271 p.

Postel, S.; P. Polak.; F. González y J. Keller. (2001). Drip Irrigation for Small Farmers. A New Initiative to Alleviate Hunger and Poverty. International Water, 1(26): 3-13.

Rodrigo López, J.; Hernández Abreu, J.M.; Pérez Regalado, A. y González Hernández, J.F. 1997. Riego localizado. CENTER. YRYDA. 2ª edición. Mundi-Prensa. Madrid, España. 399 p.

UNE 53375. (1983). Plásticos. Determinación del contenido en negro de carbono en poliolefinas y sus transformados. Parte 1: Ensayo en atmósfera de nitrógeno. Asociación Española de Normalización (AENOR). Madrid, España.

UNE 53131.(1990).Sistemas de canalización en materiales plásticos para conducción de agua. Polietileno (PE). Parte 2: Tubos. Asociación Española de Normalización (AENOR). Madrid, España.

UNE 53367. (2000). Plásticos. Tubos de polietileno PE32 y PE40 para microirrigación. Características y métodos de ensayo. Asociación Española de Normalización (AENOR). Madrid, España.

UNE-EN ISO 6259-1:2002. Tubos termoplásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 1: Método general de ensayo (ISO 6259-1:1997). Asociación Española de Normalización (AENOR). Madrid, España.

UNE-EN ISO 9261:2010. Equipos de riego. Emisores y tuberías emisoras. Especificaciones y métodos de ensayo (ISO 9261:2004). Asociación Española de Normalización (AENOR). Madrid, España.

## NUEVA GUÍA TÉCNICA PARA EL DISEÑO, FABRICACIÓN E INSTALACIÓN DE TUBERÍAS A PRESIÓN DE POLIÉSTER REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO

*Berganza López, B. (1), Hernández Redondo, J.A(2), Andrés Martín, F.R. (3)*

- 1) Jefe de Dep. Regadíos y Agua, TRAGSA, [bberganz@tragsa.es](mailto:bberganz@tragsa.es)
- 2) Jefe Oficina Operativa Extremadura, SEIASA, [j.hernandez@seiasa.es](mailto:j.hernandez@seiasa.es)
- 3) Laboratorio de Hidráulica, CEDEX, [francisco.r.andres@cedex.es](mailto:francisco.r.andres@cedex.es)

### 1) Resumen

En los últimos dos años se ha estado trabajando en la elaboración de una nueva Guía Técnica para el diseño, fabricación e instalación de tuberías a presión de Poliéster Reforzado con Fibra de Vidrio. El objetivo perseguido ha sido recopilar la experiencia acumulada sobre este producto en las etapas anteriores en los distintos ámbitos o fases que abarca: diseño, fabricación e instalación. Con todos los actores implicados reunidos (fabricantes, usuarios, laboratorios, universidades y administraciones) se han revisado los procedimientos y normativas existentes para promover las máximas garantías de calidad y durabilidad. En concreto, se han incorporado novedades en cuanto a los estándares de calidad exigibles en la fabricación (nuevos ensayos de control de producto así como mayores prestaciones exigibles en las propiedades mecánicas), se ha revisado intensamente las diversas metodologías de cálculo mecánico existentes y se han comparado entre sí, y se han unificado criterios, como por ejemplo los de tipo dimensional, con el fin de simplificar la variabilidad vinculada a los diferentes procesos de fabricación. Por último, se ha tratado de estandarizar las recomendaciones sobre la instalación de las tuberías.

### 2) Introducción. Objetivo del trabajo.

En el sector del riego, la tubería de Poliéster Reforzado con Fibra de Vidrio es una tubería de amplia difusión. Resulta particularmente interesante la relación calidad/precio que ofrece, frente a otros tipos de materiales, el en el rango de diámetros DN500-1400 y presiones de trabajo PN 6- PN 16.

Hace dos años, aproximadamente, se formaron equipos de trabajo con fabricantes, usuarios, laboratorios, universidades y administraciones, con el ánimo de revisar la normativa existente y los códigos de buenas prácticas de instalación y mantenimiento de las tuberías de Poliéster Reforzado con Fibra de Vidrio. La experiencia adquirida en los últimos años con el uso de esta tubería permitía abordar el objetivo de elaborar un documento (Guía Técnica) en el que se unificaran criterios y se tratara de elevar el estándar de calidad (en la fabricación, montaje y explotación).

Actualmente existen en España tres métodos de fabricación de tuberías de PRFV, muy diferentes entre sí, (enrollamiento helicoidal, enrollamiento continuo y centrifugado) que le otorgan al producto características propias y particularidades que el usuario final no puede obviar. Por este motivo, se decidió tratar de consensuar y unificar criterios de diseño y de uso, con el fin de simplificar la citada variabilidad.

### 3) Descripción del proceso

La Guía se ha estructurado en diferentes capítulos que se describen brevemente a continuación. En el presente documento se hará especial mención a las novedades incluidas en cada capítulo.

#### 1) Consideraciones generales

Breve resumen de las definiciones de aplicación así como revisión de la normativa vigente. La Guía está especialmente dirigida a instalaciones enterradas a presión, para suministro de agua potable o de riego. Incluye especificaciones tanto para tubería como piezas especiales del sistema.

#### 2) Componentes del sistema

Descripción de los elementos constituyentes del sistema: tubos, juntas y piezas especiales. Propiedades mecánicas y químicas exigibles, criterios de diseño y dimensiones.

En este apartado se ha tratado de unificar al máximo las diferencias dimensionales derivadas de los diferentes sistemas de fabricación y se ha prestado especial atención a nuevos requerimientos en cuanto a las propiedades mecánicas y químicas, a destacar la absorción de agua permitida por las resinas que se emplean en la fabricación de los tubos. Asimismo, se han incrementado los requerimientos de dureza Barcol a corto plazo como medida rápida en el control del nivel de curado de las resinas.

La Guía hace recomendaciones sobre las curvas de diseño de los tubos para la medida de la rigidez circunferencial a largo plazo. Se han incrementado los requerimientos de resistencia a la tracción circunferencial y longitudinal, respecto a los valores exigidos por norma. Respecto a las uniones, se recoge una descripción de los diferentes tipos de junta existentes en el mercado, con información técnica de tipo dimensional y mecánica. En cuanto a las piezas especiales, se ha tratado de ampliar información referente a criterios de diseño y constructivos, y acomodar a la nueva normativa los criterios de uso habituales.

#### 3) Fabricación

Descripción y requerimientos de los materiales empleados en la fabricación de tubería y accesorios de PRFV (básicamente, resina de poliéster, fibra de vidrio y cargas inertes) y descripción de los principales sistemas de fabricación (enrollamiento continuo, enrollamiento helicoidal, centrifugado y laminación manual – para piezas especiales y/o reparaciones-).

Especial mención requiere la introducción de nuevos criterios exigibles a las resinas (como es la absorción de agua admisible) y la recomendación de limitar el contenido de carbonato cálcico en la fabricación. Se unifican requerimientos sobre las materias primas, en cuanto a ensayos y propiedades, y se describe cada sistema de fabricación en el que se pone de manifiesto las particularidades propias de cada uno y la estructura tipo del laminado final, con especificación de las materias primas que se utilizan en cada capa estructural.

#### 4) Diseño hidráulico

Breve descripción de los criterios habituales de diseño de las redes de riego y/o abastecimiento. Con especial atención a la definición de caudales en las redes y cálculo de las pérdidas de carga.

#### 5) Diseño mecánico



Comparativa entre los métodos habituales de cálculo mecánico para este tipo de tubería, AWWA M45 y CEN TR-1295-3 opción A. Se establecen recomendaciones en el uso de cada uno de los métodos al tener bases de cálculo diferentes y parámetros de instalación distintos, aún siendo ambos igualmente válidos. Así por ejemplo, el número de variables incluidas en el proceso de cálculo o la simplicidad en la elección de los parámetros que caracterizan los suelos, son algunas de las diferencias que aparecen entre cada uno de ellos.

6) Mantenimiento y reparación

Procedimiento para la ejecución de reparaciones en tubos y accesorios. Unificación de criterios respecto a las recomendaciones propias de cada fabricante. Especificaciones particulares para los diferentes sistemas de fabricación.

7) Consideraciones constructivas

Recomendaciones para la manipulación, transporte y almacenamiento de tubos y accesorios. Guía de instalación en zanja (con especial atención a los rellenos) y en condiciones especiales (tubería aérea o hinca). Anclajes, conexiones con obras de fábrica e instalación de accesorios (valvulería...).

En este apartado se han unificado los criterios y recomendaciones existentes y se han marcado los requerimientos mínimos de instalación, en particular, los relacionados con la calidad de los rellenos en zanja. La tubería de PRFV, por ser una tubería de tipo flexible, necesita de la contribución del terreno para resistir las cargas a las que se ve sometida, por esta razón, la instalación adquiere un papel relevante en el diseño, la comprobación y la ejecución de las secciones tipo de zanja correspondientes. Se aportan, además, detalles constructivos para resolver la amplia variabilidad de elementos singulares que puedan aparecer en las redes (derivaciones, codos, valvulería, conexiones con arquetas...).

8) Gestión de la calidad

De especial relevancia en la Guía, se han revisado los ensayos prescritos por norma (para tubos y uniones, en la fabricación) y se han establecido nuevas frecuencias de control en fábrica. Del mismo modo, también se ha actualizado el procedimiento de prueba a la tubería instalada. Y en algunos casos se han incrementado los requerimientos de los ensayos normativos (se ha elevado el valor de dureza Barcol exigible a corto plazo y se han incrementado los requerimientos de tracción longitudinal y circunferencial por encima de los marcados por la norma de producto).

Por último, se ha incluido un Anexo con nuevos ensayos en proceso de definición y desarrollo, que buscan incrementar las exigencias de calidad al producto, sobre los ya requeridos por la normativa vigente. Estos ensayos hacen referencia a la dureza Barcol a corto y largo plazo, absorción de agua largo plazo de las resinas empleadas y del laminado, ensayo de impacto, ensayo de fatiga, ensayo de resistencia química a valores extremos de pH y deflexión a largo plazo en condiciones de pH ácido/básico.

El ensayo de dureza Barcol a largo plazo pretende comprobar que la dureza de las resinas se mantiene por encima de unos valores mínimos durante la vida útil de la tubería, ya que se trata de una propiedad cuyo valor disminuye con el envejecimiento del material.

Se establecen los criterios básicos del ensayo, en fase de desarrollo, de absorción de agua de las resinas empleadas en la fabricación y del producto terminado (laminado) a largo plazo. Se pretende acotar los valores máximos exigibles dado que una de las causas de deterioro acelerado de este tipo de tubos se relaciona con la presencia de agua en su estructura interior.

El ensayo de impacto, de nueva inclusión, pretende medir la sensibilidad de los tubos a recibir golpes (la caída de piedras es un riesgo común en la instalación en zanja) y

su capacidad a resistirlos sin sufrir daños estructurales que comprometan sus prestaciones mecánicas.

Con el ensayo de fatiga se pretende evaluar la pérdida de propiedades que sufren los tubos con el paso del tiempo (en concreto, su resistencia a soportar presión interna) cuando se ven sometidos a ciclos de presurización- despresurización (algo muy habitual en las redes de riego).

El ensayo de resistencia química a valores extremos de pH pretende garantizar la inercia química de las resinas empleadas frente a agentes externos que pudieran comprometer su viabilidad. Se busca reproducir el posible ataque al que se ven sometidas las conducciones en suelos agresivos, por hormigones o por presencia de fertilizantes disueltos en las aguas de transporte.

Por último, el ensayo de deflexión a largo plazo en condiciones extremas de pH pretende garantizar la resistencia a deflexión de los tubos a lo largo de su vida útil. Este factor es de gran importancia en los diámetros grandes, ya que deflexiones por encima de las previstas pueden originar fugas indeseadas aún sin romper la tubería.

#### **4) Conclusiones**

El importante esfuerzo realizado por parte de la Sociedad Estatal SEIASA, la empresa pública TRAGSA así como el de todos los participantes en el Grupo de trabajo, ha dado como resultado una nueva Guía Técnica actualizada, con nuevos criterios y recomendaciones de diseño, fabricación e instalación unificados, y una propuesta de controles de calidad superiores a los requeridos por la normativa vigente. Se espera que la nueva Guía Técnica sea de referencia para facilitar el trabajo de los agentes involucrados: prescriptores, fabricantes, instaladores y usuarios finales. La intención que subyace, también, es garantizar unos estándares de calidad que redunden positivamente en las prestaciones ofrecidas por un producto de gran interés en el sector del riego.

#### **5) Agradecimientos**

Mención especial requiere en este apartado la labor realizada por el equipo de Luis Balairón desde el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, en su coordinación del grupo de trabajo y la elaboración de los documentos finales. En concreto, Francisco R. Andrés y María Isabel Berga. Cabe destacar también a otros colaboradores del CEDEX (Ángel Leiro, Ismael Carpintero y Jorge Mora). Nuestro agradecimiento a los fabricantes (Amitech, Protesa, Delta y Adequa), a los laboratorios (Instituto E. Torroja –Jose M. Chillón- y Silvia González, de la Universidad Rey Juan Carlos) y otros organismos colaboradores (ITACYL – David Martínez-, ACUAMED y SARGA). Sin todos ellos no hubiera sido posible completar la elaboración de esta Guía Técnica.



## DISEÑO DEL PULSO ÓPTIMO DE RIEGO EN EL CULTIVO DE FRESA CON EL MODELO NUMÉRICO HYDRUS 2D

*García Morillo, J.*<sup>1</sup>, *Rodríguez-Díaz, J.A.*<sup>1</sup>, *Martín Arroyo, M.*<sup>1</sup>, *Camacho, E.*<sup>1</sup>, *Montesinos Barrios, P.*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad de Córdoba. Departamento de Agronomía, Campus de Excelencia Internacional Agroalimentario, ceiA3. E-mails: [g62gamoj@uco.es](mailto:g62gamoj@uco.es), [jarodriguez@uco.es](mailto:jarodriguez@uco.es), [o02maarm@uco.es](mailto:o02maarm@uco.es), [ecamacho@uco.es](mailto:ecamacho@uco.es), [pmontesinos@uco.es](mailto:pmontesinos@uco.es)

### Resumen

El cultivo intensivo de fresa, que se desarrolla en macrotúneles de plástico sobre lomos acolchados, demanda volúmenes importantes de agua para satisfacer las necesidades hídricas del cultivo así como para labores de preparación del suelo o alomado y riego de apoyo en la fase de plantación. El riego de la fresa es especialmente complejo dado que es un cultivo que se produce bajo plástico en suelos muy arenosos (habitualmente con un contenido de arena superior al 90%), con escasa capacidad de retención de agua. A pesar de esta dificultad, no es habitual que exista una programación del riego basada en la medida de las principales variables que afectan al cálculo de las necesidades hídricas del cultivo. En este trabajo se proponen medidas de mejora en el manejo del riego, basadas en la determinación del pulso óptimo que evite las pérdidas por percolación en tres fases de desarrollo del cultivo. Para ello se ha utilizado el modelo de simulación del movimiento del agua en el suelo Hydrus 2D. Se han simulado diferentes estrategias de riego para aplicar la  $ET_c$  del cultivo con emisores de  $5 \text{ l.h}^{-1}\text{.m}$  en tres etapas diferentes del cultivo, inicio, mediados, y final de campaña y en las que por término medio se necesitan tiempos de riego que oscilan entre los 10-20 minutos al inicio de la campaña y 40-60 minutos al final de campaña.

### 1- Introducción. Objetivo del trabajo

El riego por goteo está considerado como uno de los sistemas de riego más eficientes dado que permite tener un mayor control sobre las aplicaciones de agua, fertilizantes y pesticidas. El conocimiento del perímetro de bulbo húmedo que genera es crítico para manejar el sistema de riego de manera eficiente (Samadianfard, *et al.*, 2012).

Los modelos numéricos son una herramienta útil para analizar la evolución del bulbo húmedo durante el riego a fin de determinar estrategias de manejo del riego por goteo que determinen el tiempo de riego y optimicen la eficiencia del uso del agua. HYDRUS 2D (Šimůnek *et al.*, 1999) es un modelo que permite simular el movimiento del agua, temperatura y solutos en dos dimensiones en un suelo no saturado. La precisión del modelo para simular el movimiento del agua en el suelo ha sido puesta de manifiesto en varios estudios, por ejemplo Šimůnek *et al.* (2008).

El objetivo de este trabajo es aplicar el modelo numérico Hydrus 2D para estudiar la dinámica del agua en el cultivo de fresa bajo diferentes estrategias de riego. Para ello se ha calibrado el modelo con datos medidos de bulbo húmedo en una urna en laboratorio. Posteriormente se han simulado estrategias de riego orientadas a aplicar la  $ET_c$ , definiendo el pulso óptimo de riego que evite las pérdidas de agua por percolación.

## 2. Materiales y métodos

Para determinar la estrategia de riego óptima para las condiciones de producción de la fresa, se ha simulado el movimiento del agua en un lomo tipo para un periodo de una semana de duración en tres etapas del cultivo claramente diferenciadas, inicio (noviembre-enero), mediados (febrero-marzo) y finales de campaña (abril-junio).

La ecuación que gobierna el movimiento del flujo de agua en un suelo no saturado en el modelo es la de Richards, incluyendo el término "sumidero" (S) para considerar la absorción del agua por el sistema radicular en función del estrés hídrico y/o salino. Se introduce mediante este término un modelo de respuesta de la planta a la humedad del suelo (Šimůnek *et al.*, 2006). A continuación se muestra esta ecuación para dos dimensiones:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left[ K(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) \right] - S \quad (1)$$

En la que  $\theta$  representa el contenido volumétrico de agua [ $L^3L^{-3}$ ],  $h$  el potencial de presión [L],  $t$  el tiempo [T],  $x$  la coordenada horizontal,  $z$  la coordenada vertical y  $K$  es la conductividad hidráulica [ $L \cdot T^{-1}$ ]. En Hydrus el término  $S$  representa el volumen de agua extraído por las raíces en la unidad de volumen de suelo por unidad de tiempo. Para ello emplea una función compleja propuesta por Feddes *et al.* (1978).

El modelo resuelve la ecuación de Richards mediante la función paramétrica de van Genuchten (1980, 1987) que relaciona la humedad y el potencial del suelo mediante la siguiente ecuación:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + |\alpha \cdot h|^n\right]^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

donde  $\theta_s$  es la humedad en saturación del suelo,  $\theta_r$  es la humedad residual del suelo,  $K_s$  es la conductividad hidráulica saturada del suelo, y  $m$ ,  $n$  y  $\alpha$  son valores empíricos que afectan a la forma de la curva de retención y que como simplificación se asume que  $m = 1 - (1/n)$ .

La conductividad hidráulica no saturada  $K(h)$  se determina mediante la siguiente expresión (Mualem, 1976):

$$K(h) = K_s \cdot S_e^L \cdot \left[ 1 - \left( 1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad (3)$$

donde el término  $S_e$  es el contenido de agua adimensional o también llamado contenido de agua efectivo,  $K_s$  es la conductividad hidráulica saturada del suelo y  $L$  es un parámetro empírico relacionado con la conectividad entre los poros.

El modelo Hydrus-2D resuelve la ecuación de Richards (ecuaciones 1 a 3) sujeta a determinadas condiciones de contorno aplicando el método de los elementos finitos bajo un esquema de Galerkin. El procedimiento de cálculo se explica en detalle en Šimůnek *et al.* (1999).

Los términos  $\theta_r$ ,  $\theta_s$ ,  $\alpha$ ,  $n$ , y  $L$  que aparecen en las ecuaciones expuestas son los llamados parámetros hidráulicos del suelo, valores que determinan la forma de la curva de retención y la conductividad hidráulica, bases de la ecuación del movimiento del flujo en suelo no saturado de Richards. Estos parámetros tienen un significado físico aunque en muchas ocasiones se utilizan meramente como parámetros de ajuste (Arbat Pujolràs, 2005).

$\theta_r$  y  $\theta_s$  representan los límites de humedad entre los que se encuentra la curva de retención. El contenido de agua a saturación ( $\theta_s$ ) puede obtenerse experimentalmente y en teoría su valor coincide con el de la porosidad, pero en la práctica es inferior debido a la presencia de aire atrapado o disuelto. El contenido de agua residual ( $\theta_r$ ) también se puede obtener experimentalmente a partir de la determinación del contenido de agua de una muestra de suelo secada al aire.

Otro punto característico de la curva de retención es el potencial de entrada de aire, que corresponde al valor límite de succión para el cual los poros de mayor tamaño empiezan a perder agua. El parámetro  $\alpha$  de la ecuación de van Genuchten está estrechamente ligado a la inversa del potencial de entrada de aire. Un valor alto de  $\alpha$  (por ejemplo en suelos arenosos) implica que los suelos se desecan rápidamente ante pequeños valores de succión, mientras que un valor bajo (por ejemplo suelos arcillosos) indica una desecación lenta a medida que la succión se incrementa. En Carsel y Parrish (1988) pueden encontrarse tabulados los valores de los parámetros de la ecuación de van Genuchten en función de la textura, obtenidos a partir del promedio de un gran número de muestras.

El parámetro  $n$  también está correlacionado con la textura, aumentado a medida que aumenta el porcentaje de arena. La forma de la curva de retención es afectada por el valor de  $n$ , reduciéndose la pendiente en su zona central al aumentar el valor de  $n$  (aumentar el contenido de arena) lo que se traduce en que a igual aumento de la succión el contenido de agua se reduce más en un suelo de textura gruesas que en un suelo de textura fina.

El parámetro  $L$  está relacionado con la conectividad de los poros. Con el objetivo de simplificar la parametrización, se le atribuye el valor de 0,5 obtenido a partir del promedio de los valores determinados para muchos suelos (Mualem, 1976).

El modelo Hydrus 2D requiere de la introducción de los parámetros hidráulicos del suelo objeto de estudio. La obtención de dichos parámetros experimentalmente en laboratorio es costosa, por lo que generalmente se obtienen a partir de las llamadas funciones de edafotransferencia (FET).

Las funciones de edafotransferencia se denominan así porque transforman propiedades de los suelos fácilmente medibles en los parámetros hidráulicos del suelo (Schaap *et al.*, 2001).

Se pueden distinguir dos tipos de FET, las que utilizan técnicas estadísticas de regresión y las que utilizan redes neuronales y tratamiento de bases de datos (Vereecken *et al.*, 2008). En las del primer tipo, los parámetros hidráulicos se determinan mediante ecuaciones de regresión lineal y no lineal que relacionan los datos de textura, densidad aparente y/o contenido de materia orgánica (entre otras posibles variables) con valores de humedad del suelo cuando el potencial es conocido, es decir, ciertos puntos de la curva de retención.

Las redes neuronales no requieren una ecuación de cálculo previamente establecida sino que utilizan procedimientos de calibración iterativos para relacionar las características de los suelos con las propiedades hidráulicas de sus bases de datos.

El modelo ROSETTA (Schaap *et al.*, 2001) está basado en FET de redes neuronales y es un programa ampliamente utilizado en modelización de los parámetros hidráulicos del suelo. Este software utiliza distintas bases de datos dependiendo del grado de detalle y calidad de los datos de entrada sobre características de suelo. Numerosos autores han utilizado el modelo ROSETTA para la estimación inicial de los parámetros hidráulicos de suelo, como Schott *et al.* (2000), Skaggs *et al.* (2004), Jiang *et al.* (2010), Jiménez-Martínez (2010), Kanzari *et al.*, (2012a) entre otros.

Skaggs *et al.* (2004) midieron la distancia al emisor y profundidad de bulbo húmedo obteniendo los parámetros hidráulicos del suelo mediante “Rosetta completo”, es decir, con todos los datos de entrada que requiere (densidad aparente, porcentajes de arena, limo y arcilla, y el contenido de agua a 33 y 1500 kPa) y comparándolo con los parámetros de suelo obtenidos introduciendo sólo la textura de suelo. Comprobaron que la simulación obtenida por el modelo Hydrus con los parámetros de suelo obtenidos con todos los datos de entrada de Rosetta eran iguales que la simulación obtenida a partir de los datos texturales del suelo.

El modelo Hydrus 2D/3D tiene incorporado el modelo ROSETTA (Lite Versión 1.1) para calcular los parámetros hidráulicos del suelo en función de la clase textural de éste.

Para calibrar el modelo se ha medido el bulbo húmedo en un ensayo llevado a cabo en laboratorio en una urna de metacrilato. La urna tiene unas dimensiones de 70 cm de largo, 50 cm de alto y 5 cm de ancho. Paralelamente, en el modelo Hydrus se ha modelizado una geometría rectangular idéntica a la urna, de 70 cm de largo por 50 cm de alto para simular el flujo vertical en dos dimensiones en el plano (XZ). El perfil está compuesto de una capa homogénea de suelo arenoso de la misma textura que el ensayado en la urna (94% arena, 4% limo, 2% arcilla).

Una vez calibrado el modelo se ha simulado el frente húmedo que genera un gotero de  $5 \text{ l.h}^{-1}\text{m}^{-1}$  en un lomo típico del cultivo de fresa. Se ha adoptado una geometría plana, y se ha simulado la mitad de un lomo. El lomo presenta una profundidad de 50 cm, con una anchura en coronación de 25 cm y de 35 cm en la base. Las condiciones de contorno fijadas han sido flujo variable en una longitud determinada para simular el flujo del emisor, ausencia de flujo en el resto de la geometría, ya que está acolchado con plástico dentro de un túnel y por tanto no influye el agua de lluvia, y drenaje libre en el límite inferior (figura 1).

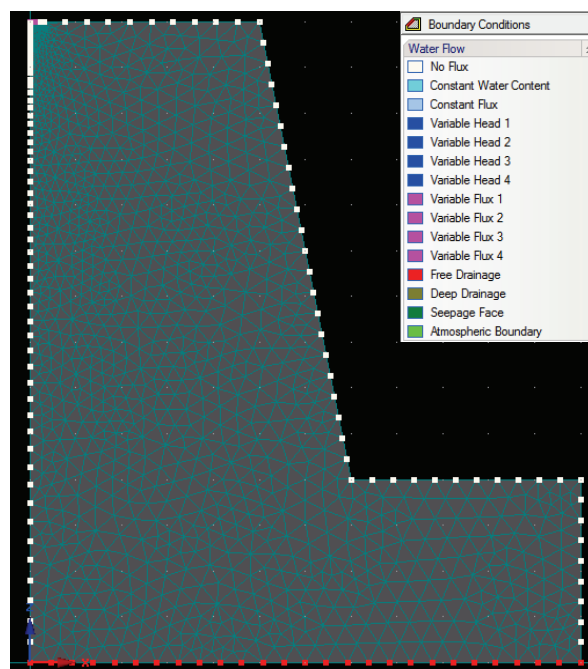


Figura 1. Geometría, malla y condiciones de contorno generadas para la simulación.

La textura del suelo corresponde al suelo de una finca comercial de fresa (94% arena, 4% limos y 2% arcilla) obteniéndose los principales parámetros hidráulicos mediante el modelo ROSETTA.

Se ha fijado la profundidad y ancho radicular para cada periodo de cultivo simulado. En los meses de mayor demanda, de abril a junio, se ha fijado la profundidad radicular en 40

cm y el radio máximo de raíces en 20 cm. Estos datos están en la línea de los empleados por Gärdenäs *et al.* (2005) para simular el flujo de agua en el cultivo de fresa.

Debido a que el lomo se encuentra acolchado, se ha considerado que toda la evapotranspiración es debida a la transpiración de las plantas (Jiménez-Martínez, 2010). Igualmente no se considera que la lluvia influya en el contenido de humedad del suelo debido a que el cultivo se desarrolla en lomos acolchados bajo túnel.

El contenido inicial de agua se ha fijado para todo el perfil en  $0,20 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , cercano a capacidad de campo para un suelo con alto contenido en arena, como puede ser un suelo arenoso, arenoso-franco, o franco-arenoso.

### 3. Resultados y conclusiones.

Se han simulado tres etapas o periodos del cultivo claramente diferenciados. En la fase inicial del cultivo (noviembre-enero) las necesidades hídricas del cultivo oscilan en torno a 1 mm/día. Debido a que los valores medios de  $ET_c$  en esta etapa son muy bajos y unidos al hecho de que las plántulas en esta fecha tienen muy poco desarrollo vegetativo y radicular, no se ha considerado la  $ET_c$  en la evolución de la humedad del suelo. El tiempo de riego necesario para satisfacer las necesidades del cultivo oscila entre los 10 y 20 minutos para una cinta de riego de  $5 \text{ l.h}^{-1}.\text{m}$ . De la simulación realizada con el modelo se desprende que el pulso efectivo de riego en esta primera fase de la campaña comienza con un tiempo de 10 minutos y se irá incrementando hasta un máximo de 20 minutos a medida que las plantas se van desarrollando y las raíces van creciendo. Este pulso se registra a 12 cm de profundidad y es inapreciable a 25 cm, con lo que se consigue mantener la humedad en los primeros 12 cm de suelo, donde se concentran las raíces en esta etapa.

En la etapa de mediados de campaña (febrero-marzo) el valor de  $ET_c$  promedio dentro de invernadero asciende a 2,5 mm/día. El tiempo de riego requerido por el cultivo oscila entre los 20-40 minutos diarios para una cinta de riego de  $5 \text{ l.h}^{-1}.\text{m}$ . De la simulación realizada con el modelo se observa que el pulso efectivo de riego comienza con tiempos de riego cercanos a los 20-30 minutos que se pueden ir incrementando hasta 40 minutos a medida que aumentan las necesidades hídricas del cultivo y se va desarrollando el cultivo. Se observa que con estos pulsos de riego la humedad se registra a 12 cm y levemente a 25 cm, pero no se registra a 40 cm, favoreciendo la concentración de la humedad en los primeros 25 cm de suelo donde se encuentran las raíces.

En la etapa de final de campaña (máxima demanda) los requerimientos hídricos del cultivo aumentan considerablemente desde principio de abril hasta mayo-junio en los que la demanda evaporativa se va incrementando de forma significativa. El valor medio de  $ET_c$  estimado en estos meses asciende a 5 mm/día. Los tiempos de riego teóricos para satisfacer las necesidades del cultivo oscilan entre los 40-60 minutos diarios para una cinta de  $5 \text{ l.h}^{-1}.\text{m}$ . En esta etapa, los pulsos de riego típicos registrados en campo según la gestión habitual de los regantes aumentan considerablemente, siendo habitual aplicar pulsos de riego que oscilan entre 90 y 120 minutos, generalmente aplicados en dos pulsos de riego cercanos a una hora. Para aplicar la  $ET_c$  del periodo punta se han simulado tres estrategias:

1. Un único pulso de 1 hora de duración (hora de inicio 10 de la mañana).
2. Dos pulsos de 30 minutos (con horas de inicio 10 de la mañana y 3 de la tarde).
3. Tres pulsos de 20 minutos diarios (con horas de inicio a las 10, 15 y 18 horas).

En esta época final, en la que las temperaturas comienzan a ascender de manera considerable y debido a que la planta se encuentra en plena fase de fructificación, se ha previsto que el riego sea diario. Se han simulado un periodo de una semana promedio del mes de mayo y un volumen de agua aplicado equivalente a la  $ET_c$  del cultivo en esa época. En las tres simulaciones el volumen total de agua diaria aplicada ha sido de 1 litro diario y 7 litros semanales. Se ha considerado que las raíces en esta etapa tienen una profundidad



máxima de 40 cm encontrándose la máxima densidad de raíces a 20 cm, y que el radio máximo es de 20 cm, con la máxima densidad de raíces a 10 cm.

En la figura 2 se observa que para las simulaciones llevadas a cabo el bulbo húmedo que se genera se mantiene en los primeros 20 cm del suelo, aunque si bien en las tres estrategias después de una semana aumenta la humedad en todo el lomo. En la fase de redistribución de la humedad en el suelo se observa como unen los frentes de humedad de la parte superficial del lomo con la humedad existente en las capas más profundas.



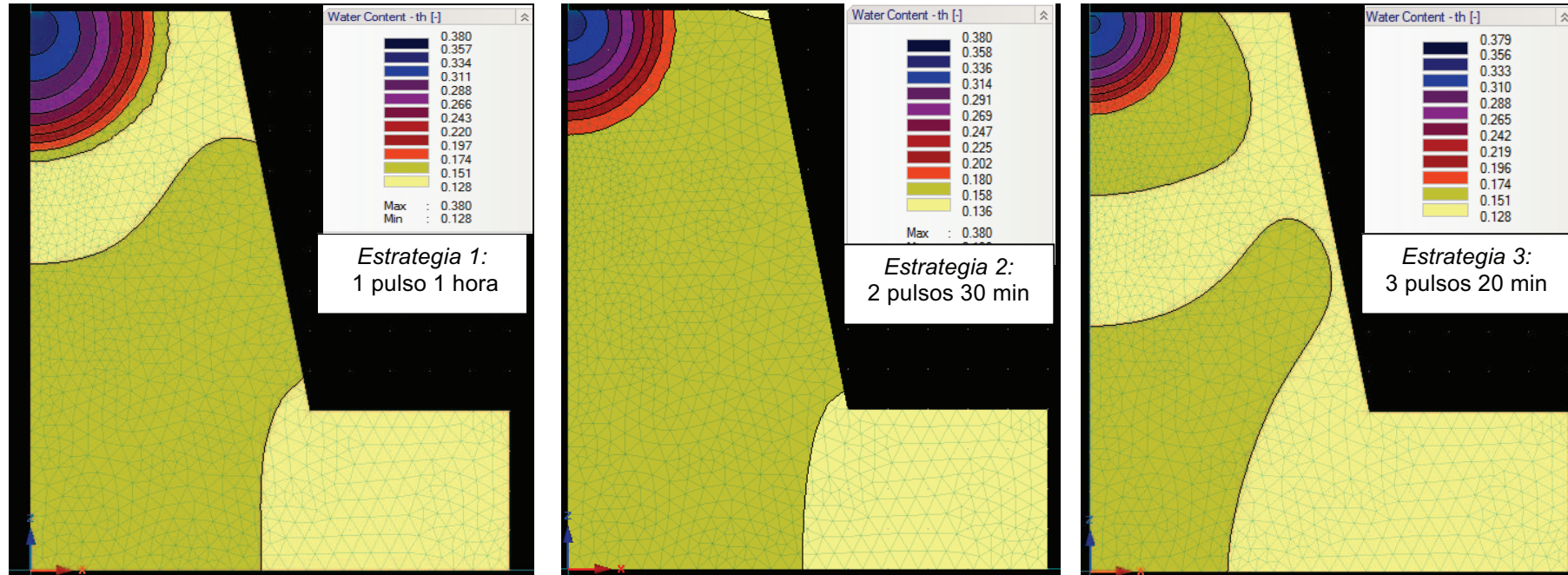


Figura 2. Simulación del contenido de agua en el suelo ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) al final del último evento de riego para las estrategias 1, 2 y 3

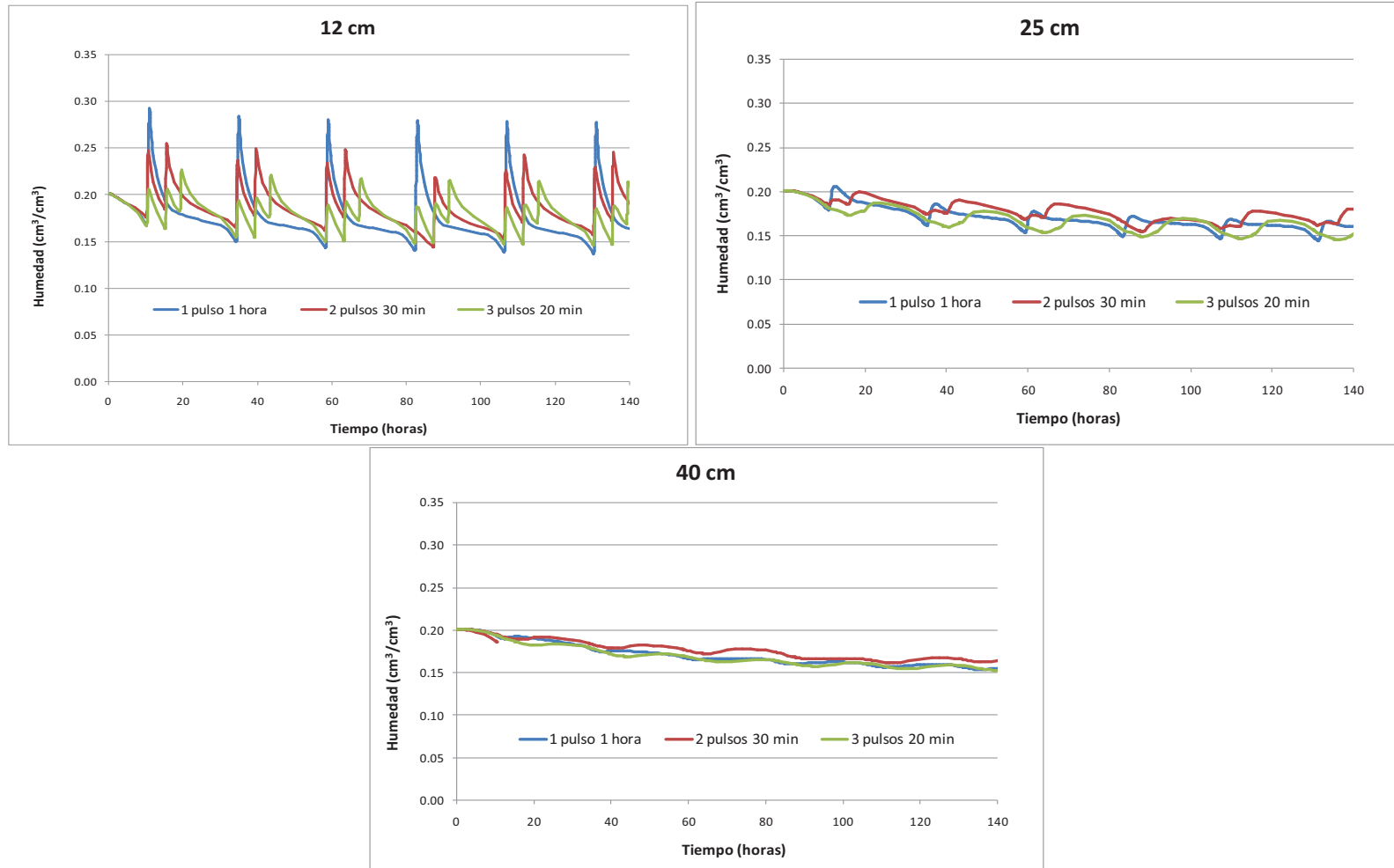


Figura 3. Contenido volumétrico de humedad en el suelo ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) a 12, 25 y 40 cm para las estrategias 1, 2 y 3



En la figura 3 se puede apreciar que la humedad que se alcanza a los 12 cm es mayor para un pulso de 1 hora (estrategia 1) alcanzando valores de humedad en torno a  $0,28 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ . En la estrategia 2 se registran valores de humedad cercanos a  $0,25 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  pero durante más tiempo que en la estrategia 1. La estrategia 3 mantiene la humedad en valores cercanos a  $0,2 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  durante más tiempo a lo largo del día que las estrategias 1 y 2. En los tres casos la humedad mínima simulada es similar y alcanza el valor de  $0,15 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ .

La humedad del pulso de riego se registra a los 25 cm de la superficie del lomo para las tres estrategias de riego. En los tres casos la humedad se mantiene en el mismo intervalo de  $0,15\text{-}0,20 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ . A 40 cm de la superficie del lomo los cambios de humedad son muy leves para las tres estrategias, manteniéndose en los tres casos por encima de  $0,15 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ .

En resumen, el comportamiento de las tres estrategias de riego diseñadas para aplicar la  $ET_c$  del cultivo en el período de máxima demanda, a 25 cm y 40 cm es similar. La mayor diferencia se encuentra en los primeros 12 cm del perfil. En esa franja la estrategia 3, que aplica 3 pulsos de 20 minutos, presenta la ventaja de que mantiene la humedad cercana a un valor medio de  $0,2 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  durante más tiempo a lo largo del día, evitando picos acentuados de humedad. Aplicar las necesidades de cultivo en varios pulsos de riego de menor duración es una estrategia muy recomendable especialmente en suelos con poca capacidad de retención de la humedad, como son los suelos destinados al cultivo de fresa en la zona de estudio.

#### 4. Conclusiones.

Se ha comprobado que el modelo Hydrus es una herramienta adecuada para simular el movimiento del agua en el suelo, y por tanto poder definir diferentes estrategias de riego eficientes que eviten las pérdidas de agua por percolación y de nutrientes por lixiviación. En el caso del cultivo de fresa se han simulado diferentes estrategias de riego para aplicar la  $ET_c$  del cultivo con emisores de  $5 \text{ l.h}^{-1}\text{.m}$  en tres etapas diferentes del cultivo, inicio, mediados, y final de campaña. Por término medio se necesitan tiempos de riego que oscilan entre los 10-20 minutos al inicio de la campaña y 40-60 minutos al final de campaña, en pulsos de no más de 20 minutos.

Los tiempos de riego aplicados en campo por los agricultores locales son superiores, ya que se aplica por término medio entre 1,5 y 2 veces la  $ET_c$ . Se recomienda revisar la programación del riego, adaptando el riego a las necesidades del cultivo, manteniendo la humedad en los primeros 30-40 cm de suelo y evitando así la pérdida de agua por percolación así como la posible contaminación del acuífero por lixiviados.

#### 5. Bibliografía

Arbat Pujolràs, G., 2005. Desarrollo y validación de un modelo de simulación de la dinámica del agua en el suelo. Aplicación al diseño agronómico y al manejo en riego localizado. Tesis Doctoral, Universidad de Lleida.

Carsel, R. and Parrish, R., 1998. Developing joint probability of soil water retention characteristics. *Water Resources Research*, 24 (5), 755-769.

Feddes, R. A., Kowalik, P.J., Zaradny, H., 1978. *Simulation of Field Water Use and Crop Yield*, John Wiley & Sons, New York, NY.



- Gärdenäs, A.I., Hopmans, J.W., Hanson, B.R., Šimůnek, J., 2005. Two-dimensional modeling of nitrate leaching for various fertigation scenarios under micro-irrigation. *Agricultural Water Management* 7, 219-242.
- Jiang, S., Pang, L., Buchan, G., Šimůnek, J., Noonan, M., Close, M. 2010. Modelling water flow and bacterial transport in undisturbed lysimeters under irrigations of dairy shed effluent and water using Hydrus-1D. *Water Research* 44, 1050-1061.
- Jiménez-Martínez, J. 2010. Aquifer recharge from intensively irrigated farmland. Several approaches. PhD Thesis, Technical University of Catalonia.
- Kanzari, S., Hachicha, M., Bouhlila, R., Battle-Sales, J., 2012a. Characterization and modeling of water movement and salts transfer in a semi-arid region of Tunisia (Bou Hajla, Kairouan)–Salinization risks of soils and aquifers. *Computers and Electronics in Agriculture*, 86, 34-42.
- Mualem, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* 12: 513-522
- Samadanfiard, S., Sadraddini, A.A., Nazemi, A. H., Provenzano, G., Kisi, Ö., 2012. Estimating soil wetting patterns for drip irrigation using genetic programming. *Spanish Journal of Agricultural Research* 10 (4), 1155-1166.
- Schaap, M.G., Leij, F.J., van Genuchten, T., 2001. ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*, 251, 163-176.
- Scott, R., Shuttleworth, W., Keefer, T., Warrick, A. 2000. Modeling multiyear observations of soil moisture recharge in the semiarid American Southwest. *Water Res. Research*, 36, nº 8, 2233-2247.
- Šimůnek, J., Šejna, M., van Genuchten, M. Th., 1999. The Hydrus-2D software package for simulating two-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably saturated media, version 2.0. Rep. IGCWMC-TPS-53, Int. Ground Water Model. Cen., Colo. Sch. Of Mines, Golden,CO, p.251.
- Šimůnek, J., van Genuchten, M. Th., Šejna, M., 2006. The Hydrus software package for simulating two and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Technical manual, Vers. 1.0. PC Progresss, Prague, Czech Republic.
- Šimůnek, J., van Genuchten, M.Th., Šejna, M., 2008. Development and applications of the Hydrus and STANMOD software packages, and related codes. *Vadose Zone*, J. 7 (2), 587-600.
- Skaggs, T.H., Trout, T.J., Šimůnek, J., Shouse, P.J. 2004. Comparison of Hydrus-2D Simulations of Drip irrigation with Experimental Observations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 130:4 (304).



Vereecken, H., Huisman, J., Bogena, H., Vanderborght, J., Vrugt, J., Hopmans, J. 2008. On the value of soil moisture measurements in vadose zone hydrology: A review. *Water Resources Research*, 44, W00D06.

van Genuchten, M. Th., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, 892.898.

van Genuchten, M. Th., 1987. A numerical model for water and solute movement in and below the root zone. Res. Rep. 121. U.S. Salinity Lab., Riverside, C.A.

## SISTEMA DE APOYO A LA TOMA DE DECISIONES PARA EL TELEMANDO DEL SISTEMA DE TRANSPORTE DE AGUA EN ALTA DE LA ACEQUIA REAL DEL JUCAR

*Martinez Alzamora, Fernando (1) (P), Bou Soler, Vicente (2), Corts, Antonio (3),  
Hervás, Alberto J. (4)*

<sup>1</sup> Cat. Ing. Hidráulica, Instituto de Ingeniería del Agua y M.A (IIAMA), Universitat Politècnica de València, Camino Vera, bq 5J, bajo 46022 Valencia, [fmartine@hma.upv.es](mailto:fmartine@hma.upv.es)

<sup>2</sup> Investigador contratado, Instituto de Ingeniería del Agua y M.A (IIAMA), Universitat Politècnica de València, Camino Vera, bq 5J, bajo 46022 Valencia, [vibouso@dihma.upv.es](mailto:vibouso@dihma.upv.es)

<sup>3</sup> Director de Operación. Operagua. Grupo Aguas de Valencia. [acorts@aguasdevalencia.es](mailto:acorts@aguasdevalencia.es)

<sup>4</sup> Ing. Agrónomo. Director de Explotación. Unidad Sindical Usuarios del Júcar. [usuj@usuj.es](mailto:usuj@usuj.es)

### Resumen

La Acequia Real del Júcar (ARJ) es una de las infraestructuras de riego más antiguas de España, ordenada construir por Jaime I en 1258. Actualmente riega 20.000 Ha de tierra fértil en la comarca de La Ribera, destinada en su mayoría a cítricos, aunque con un auge creciente del caqui. En su extremo final proporciona el agua necesaria para inundar los arrozales de la Albufera.

La Acequia Real puso en marcha en 2001 un ambicioso proyecto de presurización del sistema de riego y su conversión a goteo, destinado a mejorar de la eficiencia hidráulica del riego y la calidad de vida de los regantes, que ha conllevado un importante esfuerzo financiero por parte de las administraciones públicas.

Hasta el momento se ha completado la construcción de la red principal y de 10 de los 45 sectores de riego a goteo. El agua circula hoy día por una conducción a presión que aprovecha los 40 m de desnivel entre el túnel de la Escala de Tous y la zona regable, con el consiguiente ahorro energético.

La conducción principal da servicio a lo largo de sus 42 km, a más de 100 puntos de descarga y a 21 tomas para el riego por goteo, con 253 válvulas motorizadas. También alimenta un bombeo de emergencia para suministrar agua a Valencia, by-paseando un tramo del canal Júcar-Turia. Para controlar todo el sistema por telemando se dispone de un potente SCADA ubicado en el Centro de Control de Benimodo (Valencia). Sobre él se ha instalado la aplicación SCARed, como Sistema de Apoyo a la Toma de Decisiones, el cual permite simular en tiempo real cualquier estrategia de riego, o la operación del bombeo de emergencia

### Abstract

The Acequia Real del Jucar is one of the oldest irrigation infrastructures in Spain, ordered built by Jaime I in 1258. Currently irrigates 20,000 hectares of fertile land in the region of La Ribera, aimed mostly citrus, but with an increasing rise of persimmon. At the end provides enough water to flood the rice fields of the Albufera Lake.

The Acequia Real launched in 2001 an ambitious project to pressurize the transport system and transform the irrigation system to drip, in order to improve the hydraulic efficiency and the quality of life of the farmers, with the financial support of the public administration.

So far, the construction is completed in the main pipes and 10 of the 45 drip irrigation sectors. The water carrier supply pressurized water taking advantage of the 40 m of head difference between the Escala tunnel at Tous dam and the irrigation area, with consequent energy savings.

Along its 42 km, the main line serves over 100 discharge points and 21 connections to supply the drip irrigation network, with 253 motorized valves. It also feeds an emergency



pumping to supply water to Valencia, bypassing a stretch of the Júcar-Turia canal. To control remotely the entire system there is installed a powerful SCADA system located in the Control Center of Benimodo (Valencia). Scared application works at the same place as a Decision Support System (DSS) fed from the SCADA data, which allows simulating in real time any irrigation strategy, or the operation of the emergency pumping

## 1- Introducción

La Acequia Real del Júcar (ARJ) es una de las infraestructuras de riego más antiguas de España, ordenada construir por Jaime I en el siglo XIII. Desde entonces ha sufrido muchas ampliaciones y mejoras, siendo la última de ellas el proyecto de modernización ejecutado en 2010 para transportar el agua a presión mediante de dos colectoras que recorren la margen derecha de la acequia a lo largo de 45 Km de trazado, desde la toma en el azud de Antella hasta el término de Albal, donde la acequia actual descarga finalmente para alimentar los arrozales de la Albufera en la época de siembra. En su recorrido riega 20.000 Ha, en su mayoría de cítricos, pertenecientes a 21 términos municipales, actuando como elemento de vertebración de las comarcas de la Ribera Alta, Ribera Baja y Horta Sur.

En la figura 1 se muestra un esquema de la nueva instalación. Algunos datos significativos de la instalación son los siguientes: tubería doble en su mayor parte, con diámetros desde 2000 a 900 mm. Alimentación por gravedad desde el canal Júcar-Turia en un punto intermedio, con una carga máxima de 40 m. Presión mínima de servicio en las tomas, 30 m. Caudal máximo de transporte en presión, 10 m<sup>3</sup>/s. Número de puntos de descarga 101, agrupados en 21 tomas definitivas y otras 21 coyunturales que alimentan las fesas ubicadas en el origen de acequias para el riego a manta, aún operativas. La instalación dispone 253 válvulas motorizadas, 67 caudalímetros ultrasónicos y 75 sondas de presión, todos ellos telemididos. A 20 Km del punto de alimentación, se conecta una estación de bombeo de emergencia para reponer el agua en caso de avería del canal Júcar-Turia, que da servicio a la ciudad de Valencia, con una capacidad máxima de bombeo de 2,0 m<sup>3</sup>/s.



**Figura 1.** Esquema general de la instalación

La magnitud de la instalación, el pequeño margen de pérdidas impuesto por la cota de alimentación, el posible crecimiento de la demanda en el futuro, las limitaciones de transporte en condiciones de demanda punta, y también en situaciones de emergencia, aconsejaban disponer de un Sistema de Apoyo a la Toma de Decisiones en tiempo real (DSS).

## 2 – Materiales y métodos

El DSS de la ARJ está basado en la aplicación SCARed, desarrollada por el grupo REDHISP del IIAMA de la Universidad Politécnica de Valencia, la cual hace uso de un modelo hidráulico de la instalación construido sobre EPANET. SCARed es una aplicación de control en tiempo real para instalaciones hidráulicas, que aglutina diversos módulos orientados a:

- i) capturar los valores de las variables hidráulicas desde diversas fuentes, como PLCs, SCADAs, data-loggers, ficheros planos, bases de datos, etc, bien en tiempo real o en tiempo diferido
- ii) sincronizar, filtrar y almacenar la información de campo en una estructura de BdD propia
- iii) mostrar los valores de las variables sobre un sinóptico dinámico creado con herramientas de desarrollo standard
- iv) mostrar estos mismos valores sobre un fondo geográfico con la red superpuesta
- v) consultar y comparar los valores de las variables elegidas en una ventana aparte capaz de alojar múltiples gráficos
- vi) generar informes diversos, y
- vii) proveer servicios al usuario a través de internet, como alarmas, sms, informes diarios, etc.

En la figura 2 se muestra el sinóptico general del sistema de transporte de agua en alta de la ARJ, tal como se muestra en la aplicación SCARed, el cual a su vez visualiza el comportamiento hidráulico del sistema.

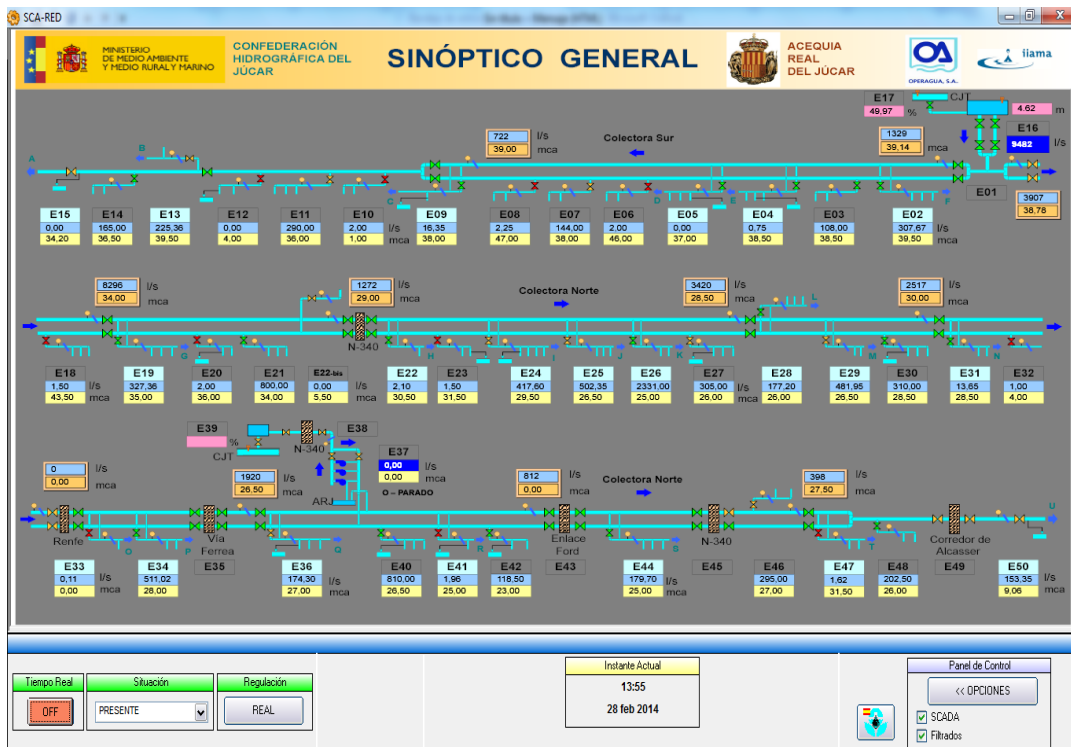
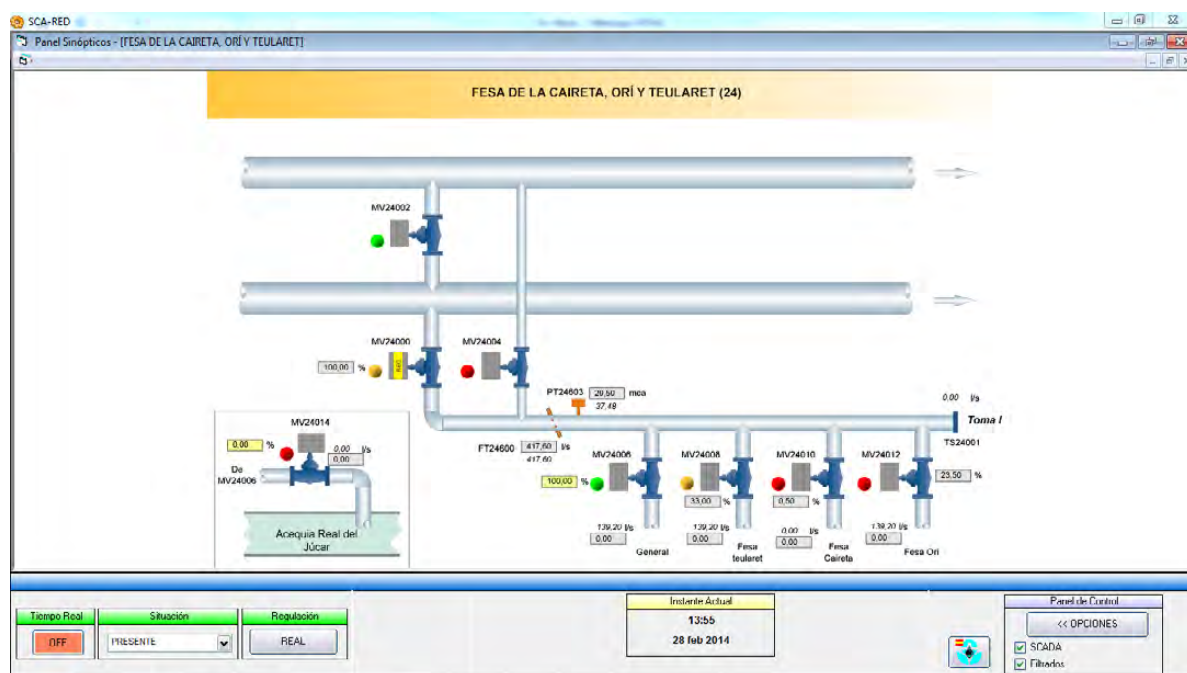


Figura 2. Sinóptico general de la ARJ en SCARed

El sistema se alimenta por gravedad desde un depósito de cabecera a la cota 76 m (esquina superior derecha del sinóptico), el cual se abastece desde el canal Júcar-Turia. La tubería principal desciende duplicada desde el depósito hasta la margen derecha de la acequia, donde se bifurca en dos colectoras. La colectora Sur (primera línea del sinóptico), discurre a lo largo de 10,3 km en esa dirección, hasta morir cerca del azud de Antella, de donde parte la antigua Acequia Real; está duplicada en un 60 % del recorrido. La colectora Norte (segunda y tercera líneas del sinóptico) discurre en sentido contrario, a lo largo de 32,1 km, hasta el término de Alcasser, estando duplicada en casi el 90 % del recorrido. Los diámetros de las conducciones oscilan desde los 2000 mm hasta los 900 mm. A unos 22 km del punto de alimentación (tercera línea del sinóptico) se encuentra el bombeo de emergencia para suministrar agua a Valencia, el cual puede tomar el agua indistintamente de la colectora Norte o de la acequia, para descargarla de nuevo en el canal Júcar-Turia, lo que permite by-pasear el tramo del canal J-T entre ambos puntos.

Sobre el sinóptico general se han representado los cruces con otras servidumbres mediante rectángulos sombreados y junto a ellos las válvulas de seccionamiento que permiten aislar algunos tramos de tubería. Los puntos donde se ubican las válvulas están equipados con caudalímetros ultrasónicos y medidores de presión. A lo largo de los 42 km de conducción hay un total de 21 derivaciones coyunturales que permiten descargar el agua a las fesas (con una o varias tomas por derivación), y otras 21 derivaciones definitivas que, además de descargar también a las fesas, permiten que el agua continúe para alimentar el sistema de riego por goteo, compuesto por 45 sectores y dos o tres cabezales por sector. La instalación del riego por goteo es una de la mayores del país; suma un total 109 cabezales, 10.000 hidrantes y 50.000 electroválvulas, con sus correspondientes contadores. Existen además 15 puntos de descarga que retornan el agua a la Acequia Real en caso de necesidad. Todos los puntos de salida a la atmósfera están equipados por una válvula telemandada, que permite regular el uso del agua, según un programa de riego previamente establecido.

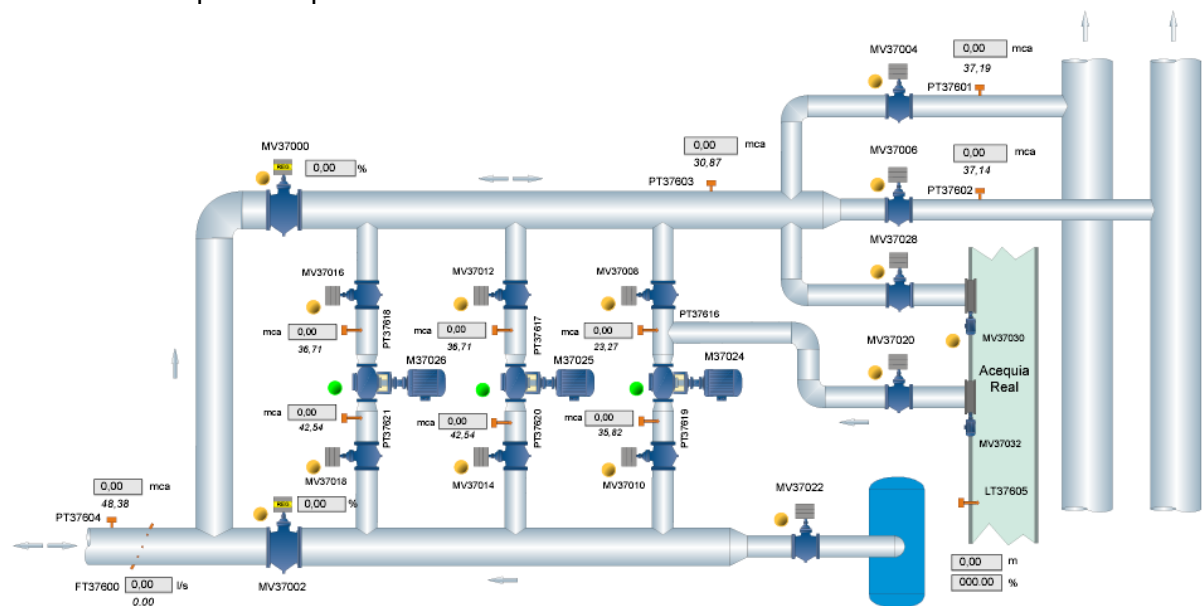
En cada una de las derivaciones hay instalada una estación remota, para el telemando de las diferentes válvulas. En la figura 3 se muestra el esquema detallado de una de ellas.



**Figura 3.** Sinóptico de una estación remota, con 4 descargas a fesas, una descarga a la Acequia, y una toma a la red de riego por goteo (toma I)

En total se dispone de 50 estaciones remotas, con sus correspondientes sinópticos, todos ellos integrados en SCARed. A través de las remotas el SCADA central recibe señales del estado de todas las válvulas (señales MVxxxx), del caudal total saliente de cada derivación, medido por un caudalímetro ultrasónico (señales FTxxxx) y de la presión de suministro antes de las válvulas de descarga (señales PTxxxx). Dicha presión es controlada por una válvula reductora de presión previa, cuya consigna está telemandada. La válvula reductora dispone además de un by-pass para poder alimentar directamente las descargas desde la otra tubería, y de una conexión entre los dos conductos, ambos controlados por su correspondiente válvula. Existen además algunas estaciones remotas especiales, como los cruces con servidumbres, las que controlan el sistema de alimentación y reparto del agua desde el depósito de cabecera, o la que controla el bombeo de emergencia.

Especial atención merece el sinóptico de la estación de bombeo de emergencia, el cual se muestra en la figura 4. En total se dispone de 3 bombas, todas ellas de velocidad variable. Las bombas pueden aspirar indistintamente de las colectoras o bien de la acequia, o incluso ambas opciones a la vez aislando para ello la aspiración de la primera bomba. Según el origen del agua, las bombas trabajarán a una u otra velocidad de giro, al cambiar la presión de aspiración. El caudal total impulsado puede consignarse a través del caudalímetro ubicado a la salida, y un automatismo se encarga de determinar las bombas activas y su velocidad de giro. También es posible el flujo inverso para retornar agua del canal a la acequia, o incluso alimentar las colectoras desde este punto, a cuyo fin se ha dispuesto la válvula de by-pass del extremo superior izquierdo.



**Figura 4.** Sinóptico de la estación de bombeo de emergencia

Las señales de todas las magnitudes medidas desde cada estación remota se reflejan sobre su propio sinóptico. Además de ello, la presión regulada y el caudal total de cada derivación se muestran sobre el sinóptico general (figura 2), junto con los caudales totalizados en las válvulas de seccionamiento de las colectoras, lo que permite tener una visión de conjunto del comportamiento del sistema.

SCARed maneja en total 950 variables hidráulicas, procedentes de 253 válvulas motorizadas, 67 caudalímetros ultrasónicos y 75 sondas de presión, más algunas señales complementarias correspondientes a niveles en el depósito, posiciones de compuertas, estado de bombas, etc. A estas hay que añadir las variables calculadas y los caudales programados en las válvulas de descarga.



SCARed lee o calcula continuamente toda esta información desde el sistema SCADA central, y la almacena en su propia base de datos, para posteriormente alimentar los diferentes sinópticos, así como el modelo hidráulico con el fin de llevar a cabo cualquier simulación. Los resultados de las simulaciones se muestran sobre los propios sinópticos de las estaciones, en una segunda casilla. Asimismo en una tercera casilla junto a los elementos de regulación regulables, se muestran los valores de las consignas aplicados en una determinada simulación.

El sistema SCADA central permite también regular por telemando el estado de cada válvula, ya sea su apertura o cierre, o bien su posición al objeto de alcanzar una determinada consigna de presión o de caudal de salida. La aplicación SCARed sin embargo, no está pensada para actuar directamente sobre las válvulas o bombas, tan solo para simular los resultados, actuando como un Sistema de Soporte a la Toma de Decisiones (SSD); solo el operador de la sala puede efectuar maniobras desde el SCADA de operación, o bien programarlas de acuerdo con las peticiones de los usuarios para el día siguiente.

#### *Modos de operación de SCARed*

SCARed puede operar de diversos modos: on line y off line, en presente, pasado o futuro, y en modo real o simulado. En el modo **ON LINE** simplemente muestra los valores de las variables medidas por el SCADA en tiempo real (presente), sobre los distintos sinópticos, con el valor añadido de poder mostrar también variables no telemidas, pero calculadas por el modelo, como por ejemplo el caudal consumido en un sector o el caudal descargado a una fesa en particular. En este modo el valor de todas las variables es refrescado cada 10 segundos. Además, tras cada refresco, puede lanzarse el modelo hidráulico para reproducir la situación actual, y comprobar así constantemente la bondad del modelo.

En el modo **OFF-LINE** se dispone de tres opciones de consulta. El modo **PRESENTE** es el modo por defecto, y permite congelar la imagen para un análisis más detallado de la situación actual del sistema en *modo real*. Si se elige el *modo simulado* en presente, se pueden establecer nuevas consignas de operación (por ejemplo, abrir una toma nueva, cerrar un ramal, activar el bombeo de emergencia, etc) y simular la respuesta del sistema en la nueva situación. Las nuevas consignas de operación se establecen sobre unas pantallas que se abren al pinchar sobre el elemento de actuación, desde los sinópticos de las remotas. Los resultados se muestran sobre la segunda casilla de los sinópticos. Es una forma de anticiparse a una posible acción del operador, para conocer su efecto sobre la red antes de tomar una decisión. .

Estando en modo off-line, podemos seleccionar el modo **PASADO**, para reproducir escenarios pasados. En este caso hay que especificar el periodo de consulta entre una fecha inicial y otra final (por defecto se toman 24 horas), y pasar a observar a continuación el comportamiento *real* del sistema en cualquier instante de dicho periodo mediante una barra de navegación. Con ello el operador puede aprender sobre la respuesta del sistema ante diversos escenarios, o bien revisar las causas de un posible malfuncionamiento de la red en un momento determinado. Se pueden también contrastar los datos reales con los simulados por el modelo en cada instante, para proceder a su calibración si fuera necesario. En modo pasado es posible también permutar al modo *simulado*, y reproducir sobre la base de un escenario real, la respuesta del sistema ante unas condiciones de trabajo alternativas. Ello está concebido para el entrenamiento de operadores, por ejemplo, para analizar su capacidad de respuesta ante una situación de emergencia simulada. También puede utilizarse para verificar modos de operación alternativos más eficientes, por ejemplo, para mejorar las presiones de suministro en algunas derivaciones cambiando el programa de riegos.

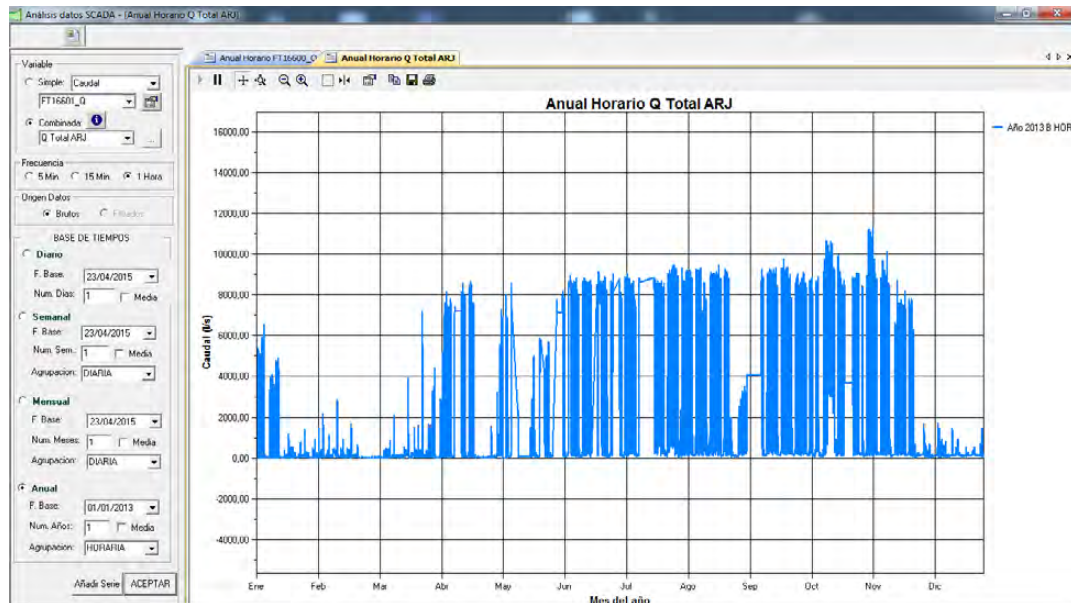
Pero la funcionalidad más importante de SCARed para el sistema en alta de la ARJ es su capacidad para simular situaciones futuras, y en particular el programa de riegos previsto para el día siguiente. En base a las necesidades hídricas de cada día, o a las demandas de los usuarios, se programa sobre una hoja Excel auxiliar la hora de apertura y cierre de las válvulas que descargan a las fesas o a la antigua acequia (figura 5), o bien se reproduce el programa de operación previsto en los cabezales del riego por goteo, si fuera el caso. A continuación SCARed leen todas las consignas y simula la operación del sistema para el día siguiente, pudiendo observando el operador las presiones resultantes, antes de aplicar definitivamente dicha programación. Pueden también simularse hipotéticas situaciones de emergencia que limitaran la capacidad de transporte en un momento determinado, o bien la operación simultánea del riego con el bombeo de emergencia. Además, las presiones de servicio dependerán del nivel del agua en la balsa de cabecera, cuya evolución durante la jornada de riego puede igualmente simularse.

DESCARGAS A FESAS Y/O ACEQUIA REAL DEL JÚCAR										
				FECHA		26/07/2013				
						viernes, 26 de julio de 2013				
Estación	Salida	Inicio	Fin	Q (l/s)	Nombre estación	Cód Sinop.	Q (m3/s)	V (m3)	Secc	
VERTIDOS A FESAS										
2	NORTE	7:15	18:15	30	FESA ANGUIERA - MOTOR	MV02006	0,03	1188	CC_CS	2440
2	SUR	1:00	1:00	0	FESA ANGUIERA	MV02008	0	0		
2	FESA	7:15	18:15	250	FESA ANGUIERA	MV02010	0,25	9900		
3	FESA	7:15	18:15	180	FESA DE L'HORTA	MV03002	0,18	7128		
3	GENERAL	7:15	18:15	100	FESA DE L'HORTA	MV03004	0,1	3960		
4	FESA	1:00	1:00	0	ROLL DELS FRARES	MV04006	0	0		
4	SUR	1:00	1:00	0	ROLL DELS FRARES	MV04008	0	0		
4	NORTE	7:10	18:10	180	ROLL DELS FRARES	MV04010	0,18	7128		
5	NORTE	1:00	1:00	0	ROLL DE MISSANA	MV05006	0	0		
5	SUR	1:00	1:00	0	ROLL DE MISSANA	MV05008	0	0		
5	FESA	1:00	1:00	0	ROLL DE MISSANA	MV05010	0	0		
6	GENERAL	1:00	1:00	0	FESA CANAleta	MV06002	0	0		
6	FESA	1:00	1:00	0	FESA CANAleta	MV06004	0	0		
7	SUR	1:00	1:00	0	FESA ALMARIET - ALASQUER	MV07002	0	0		
7	FESA	1:00	1:00	0	FESA ALMARIET - ALASQUER	MV07004	0	0		
8	SUR	1:00	1:00	0	FESA NOVELLA	MV08002	0	0		
8	FESA	1:00	1:00	0	FESA NOVELLA	MV08004	0	0		
9	GENERAL	0:00	23:59	20	CRUCE TOUS-ALBERIQUE	MV09006	0,02	1726,8	S E9	1700

Figura 5. Programación de riegos para el día siguiente (extracto)

SCARed cuenta además con herramientas complementarias para efectuar análisis sobre valores históricos de cualquier señal en un periodo determinado, permitiendo su comparación con la misma señal en otros periodos o con otras señales para el mismo periodo. En la figura 6 se muestra como ejemplo el caudal total horario suministrado a lo largo de 2013. En el panel de la izquierda se selecciona la señal y el periodo con diversas opciones, entre las que destaca la posibilidad de combinar señales. A la derecha se muestran los resultados, apilados por pestañas.





**Figura 6.** Caudal horario total suministrado en 2013

### *Confeción del modelo hidráulico*

La construcción del modelo matemático con EPANET ha supuesto un reto, para combinar las especificaciones de la demanda del goteo a través de sus curvas de modulación con la apertura y cierre de válvulas a determinadas horas mediante leyes de control. Las tomas para el goteo, se han modelado como nudos de demanda con un caudal base unitario. Los factores de modulación salen de combinar los programas de riego establecidos para todos los cabezales alimentados por cada toma. Las válvulas de descarga, por su parte, se han modelado como emisores provistos de una válvula limitadora de caudal, ya que el caudal descargado a las fesas es consignable, y depende del grado de apertura de las válvulas. Dado que todas las derivaciones van provistas de una válvula reductora de presión previa, el coeficiente de pérdidas del emisor de cada toma se ha determinado para permitir la descarga del caudal límite a válvula abierta, para una presión de consigna de la reductora de 25 m. De este modo, el operador puede fijar la hora de apertura y cierre y el caudal programado para cada válvula de descarga (figura 5), lo que se simula mediante leyes de control temporales.

La simulación de los diferentes modos de trabajo de las bombas de emergencia se ha llevado a cabo mediante reglas complejas, ya que la puesta en marcha y parada de cada modo lleva asociada la apertura y cierre de varias válvulas. El caudal bombeado es igualmente consignable, lo que se ha simulado nuevamente con una válvula limitadora de caudal a la salida. El número de bombas activas y su velocidad de giro en función del caudal demandado se ha modelado igualmente mediante reglas complejas.

Finalmente la entrada de caudal desde la toma hasta el depósito de cabecera se ha simulado mediante una válvula limitadora de caudal, cuyo caudal de consigna se ha hecho depender del grado de apertura de las compuertas, lo que permite simular las variaciones de nivel en el depósito en función de los caudales entrante y saliente cada hora.

En la figura 7 se muestran los resultados de una simulación sobre EPANET, los cuales pueden obtenerse en cualquier momento al pulsar el icono situado en la barra inferior. De este modo, el usuario puede realizar cualquier simulación adicional trabajando directamente sobre el entorno de EPANET, o bien consultar otros resultados sobre dicho entorno.

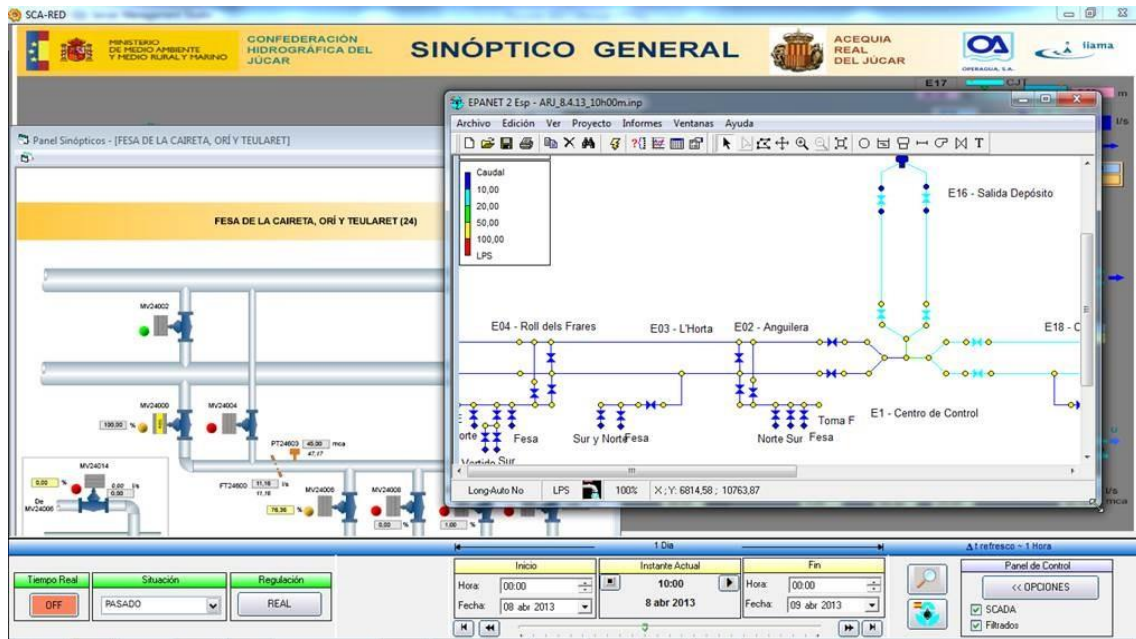


Figura 7. Exportación del modelo directamente al entorno de EPANET

### 3 – Resultados

La aplicación SCARED se puso en marcha en Octubre 2010, en el Centro de Control de Benimodo, tras un periodo de pruebas durante el cual se coordinó su funcionamiento con el SCADA de operación, un sistema Vijeo Citect de Schneider, instalado por la empresa Tefralux. Desde entonces la garantía en el funcionamiento de la aplicación está en manos de la empresa Operagua, del grupo Aguas de Valencia, la cual se encarga también del mantenimiento electromecánico y la reparación de las tuberías y valvulería.

SCARed ha funcionado sin problemas desde entonces. El volumen de datos almacenado en estos 5 años ha permitido tener un conocimiento exhaustivo del comportamiento del sistema, bajo las múltiples circunstancias acaecidas en este tiempo. La ARJ utiliza la aplicación para verificar la viabilidad del programa de riegos establecido diariamente, el cual va cambiando con la época del año, y también a medida que se van incorporando nuevos sectores de riego por goteo. El bombeo de emergencia, afortunadamente, no ha necesitado ser activado hasta ahora, aunque está en previsión utilizarlo mientras se efectúan algunas reparaciones en el canal J-T.

### 4 – Conclusiones

La conexión en tiempo real de un modelo hidráulico con el SCADA de operación, constituye una poderosa herramienta para la toma de decisiones. Además de permitir anticiparse a cualquier acción, permite también revisar situaciones pasadas, o en este caso, analizar la viabilidad del programa de riegos establecido para el día siguiente, a fin de garantizar las presiones de suministro. En otras instalaciones provistas con sistemas de bombeo, puede utilizarse para optimizar el programa de riegos, a fin de reducir los costes de operación.

Para la confeccionar y ejecutar el modelo hidráulico utiliza un simulador estándar como es EPANET, con el cual es posible simular tanto las demandas de riego mediante curvas de modulación, como la descarga directa de las válvulas a la atmósfera, estableciendo la hora de apertura y cierre de las mismas, siendo en este caso el caudal fijo o dependiente de la



presión. Otras leyes de operación más sofisticadas, propias de las estaciones de bombeo, pueden simularse igualmente utilizando reglas de control simples o complejas.

SCARed emula los sinópticos utilizados en los SCADAs reales, para facilitar su uso por parte de los operadores, y es compatible con cualquier SCADA, siempre que se establezca un protocolo de comunicación adecuado, ya que gestiona su propia base de datos. Además de la ARJ, SCARed se encuentra también operativo en otros dos grandes sistemas de abastecimiento, como son Valencia y Málaga. En el futuro, se pueden desarrollar nuevas funcionalidades basadas en el uso de modelos, para cubrir las necesidades particulares de cada usuario.

## 5 – Agradecimientos

Los autores agradecen a la ARJ por su firme apuesta en la implantación de nuevas tecnologías orientadas al uso eficiente del agua, en una infraestructura de tan gran envergadura, contribuyendo así a los objetivos establecidos del Plan Hidrológico Nacional. Asimismo los autores de la aplicación agradecen la confianza de la empresa Operagua por hacer de vehículo conductor y la colaboración de los técnicos de Tefralux para facilitar la comunicación de SCARed con el SCADA de operación.

## 6 – Bibliografía

- Acequia Real del Júcar. (2013). Página web. <http://www.acequiarij.es/>
- Alonso, J.M., Alvarruiz, F., Guerrero, D., Hernández, V., Llopis J.D., Ramos, E., Martínez, F., Bou, V. Bartolín, H. (2004). *Simulation of control strategies in water distribution systems, using SCADA in conjunction with calibrated models obtained from GIS*. Proc. 6th Int. Conf. Hydroinformatics, Singapur. World Scientific Pub. Co.
- Bou, V., Martínez, F., Conejos, P. (2006). *SCA-Red, a general purpose SCADA application for taking decisions in real time with the aid of a hydraulic model*. 8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium. WDSA. Cincinnati (Ohio)
- Hervás Ferrer, A.J. (2009). *La modernización de la Acequia Real del Júcar*. II Jornadas sobre la Gestión Eficiente del Riego. Univ. Politècnica de Valencia. 14-15 Dicbre 2009
- Ingedul, P. (2007). *Real-Time Forecasting with EPANET*. World Environmental and Water Resources Congress ASCE
- Janke, R. J., Haxton, T. M., Boccelli, D., Kramer, A., Matracia, A., Panguluri, S., Uber, J. and Hachett, S. (2010). *How Accurate Is A Hydraulic Model?* U.S. EPA, Office of R&D, Nat. Homeland Security Center. Water Infr. Prot. Division
- Martínez, F., Hernández, V., Bartolín, H., Bou, V., Alvarruiz, F., Alonso, J.M. (2005). *CALNET project: building and updating water distribution models from GIS+ CIS+ O&M+SCADA*. CCWI 2005, Exeter, UK. *Water Management for the 21st Century*, Vol. One, pp 209-214.
- Martínez, F., Hernández, V., Alonso, J.M., Rao, Z., Alvisi, S. (2007). *Optimizing the operation of the Valencia water-distribution network*. Journal of Hydroinformatics, Vol 9, nº 1, pp 65-78
- Martinez Alzamora, F, Bou Soler, V, Conejos Fuertes, P. Díaz Martínez, J. (2013) *Conexión SCADA-modelo para la simulación en tiempo real del sistema de abastecimiento de*



- agua a Valencia y su área metropolitana*. III Congreso Ingeniería del Agua. Univ. Politécnica de Valencia. Actas JIA Vol 2. Octubre 2013 pp
- Menold, P.H., Pearson, R.K., Allgöwer, F. (1999). *Online outlier detection and removal*. Proceedings of the 7th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED99) Haifa, Israel
- OPC Foundation. (2001). *OPC Data Access Interface Specification 2.05*
- Quevedo, J., Puig, V., Cembrano, G., Blanch, J., Aguilar, J., Saporta, D., Benito, G., Hedo, M., Molina, A.. (2010). *Validation and reconstruction of flow meter data in the Barcelona water distribution network*. Control Engineering Practice 18, pp 640–651
- Rofail, A., Shohouf Y. (1999). *Mastering COM and COM+*. Ed. Sybex
- Rossman, L. (2000), *Epanet 2 User's Manual*. Environmental Protection Agency. Cincinnati, OH, USA.
- Salas, P., Domene, J., Martínez, F., Bartolín, H., Bou, V. (2010). *La gestión informatizada del agua inyectada y registrada en la red sectorizada de Málaga, para la mejora de su rendimiento*. XXX Jornadas Técnicas AEAS. Sevilla.
- SCARed (2010) *Software para la simulación en tiempo real de estrategias de control en Redes de Distribución de Agua*. Grupo REDHISP. IIAMA. Univ. Politécnica de Valencia. [http://www.iiama.upv.es/iiama/src/ficha\\_software.php?lang=&id=4](http://www.iiama.upv.es/iiama/src/ficha_software.php?lang=&id=4)
- Schneider Electric. (2013) Viejo Citect. Quick start tutorial. <http://www.schneider-electric.com/products/ww/en/5100-software/5135-operating-monitoring/1500-struxurewareescada-expert-viejo-citect/>
- Velickov, S.. (2012). *Improving efficiency of water utilities: real-time modelling and Scada data assimilation*. Smart Water Network Conference. Utrech
- Tiburce V., Chopard P., Hamon J., Elain C. and Green A. (1999). *Linking SCADA to a Hydraulic and Water Quality Simulator at the 'Centre des Mouvements de l'Eau' (CME) in Paris*. CCWI'99 Conf, Exeter, UK, Water industry systems: modeling and optimization applicat. Vol. 1, pp 243-257.
- Wells, G. (2001). *Code-Centric T-SQL Programming with Stored Procedures and Triggers*, APress.

## **GRUPOS TEMAS “D”**

# **GESTION, LEGISLACIÓN, ECONOMÍA DEL RIEGO Y OTROS**

---

Formación del regante. Asesoría del riego. Aspectos sociales e institucionales, economía del regadío, legislación del agua y derechos de uso. Mercados del agua. Huella hídrica y agua virtual. Comunidades de usuarios y gestión integral de los recursos. Métodos de cálculo y repercusión sostenible del coste de los servicios de agua de riego, tarifas. Influencia del regadío en el ciclo del agua y la planificación hidrológica. Conservación de los recursos superficiales y subterráneos. Agricultura de regadío sostenible. Competitividad y mercados agrarios.





## UN SERVICIO DE RECOMENDACIONES DE RIEGO PARA EL CULTIVO DE LA FRESA BASADO EN EL PRONÓSTICO METEOROLÓGICO DE LA ET.

*Gavilán, P.<sup>1</sup>, Bohórquez, J.M.<sup>2</sup>, Ruiz, N.<sup>2</sup>, Lozano, D.<sup>4</sup>*

<sup>1</sup> Investigador Titular. IFAPA Centro Alameda del Obispo, Apdo. 3092, 14080 Córdoba, [pedrod.gavilan@juntadeandalucia.es](mailto:pedrod.gavilan@juntadeandalucia.es)

<sup>2</sup> Técnico Especialista Contratado. IFAPA Centro Alameda del Obispo. Apdo. 3092, 14080 Córdoba, [juanm.bohorquez@juntadeandalucia.es](mailto:juanm.bohorquez@juntadeandalucia.es)

<sup>3</sup> Técnica Especialista Contratada. IFAPA Centro Alameda del Obispo. Apdo. 3092, 14080 Córdoba, [natividad.ruiz.baena@juntadeandalucia.es](mailto:natividad.ruiz.baena@juntadeandalucia.es)

<sup>4</sup> Investigador contratado. IFAPA Centro Alameda del Obispo, Apdo. 3092, 14080 Córdoba, [david.lozano@juntadeandalucia.es](mailto:david.lozano@juntadeandalucia.es)

### Resumen

Dentro de las actividades que el Sistema de Asistencia al Regante (SAR) adscrito al Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera (IFAPA) realiza en el ámbito del regadío andaluz, se está trabajando para mejorar el uso y gestión del agua en el cultivo de la fresa. Uno de los objetivos es establecer una metodología para el cálculo de las necesidades de riego, que sea aplicable en las condiciones de cultivo existentes la provincia de Huelva. Este trabajo presenta un método sencillo para la realización de calendarios de riego diarios para el cultivo de la fresa en invernadero del tipo macrotúnel. Dicho método está basado en la estimación de la evapotranspiración del cultivo utilizando valores de evapotranspiración de referencia bajo plástico ( $ET_{o\text{ inv}}$ ) y coeficientes de cultivo. La  $ET_{o\text{ inv}}$  se ha estimado aplicando un modelo basado en la radiación solar, utilizando para ello las predicciones meteorológicas semanales de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Posteriormente, se realiza semanalmente la comparación de los valores estimados a partir del pronóstico meteorológico con los obtenidos usando de los datos meteorológicos medidos, como un indicador de la calidad de la información suministrada al agricultor.

### Abstract

The Institute of Agricultural and Fishery Research and Training (IFAPA in Spanish) is working to improve the management of water use in the strawberry crop. The objective of this work is to propose a methodology for estimating strawberry crop water requirements, which was applicable under growing conditions in the province of Huelva, in Southern Spain. This paper reports a simple method for performing daily irrigation schedules for strawberry crop under greenhouse. The method is based on estimating crop evapotranspiration using estimations of greenhouse reference evapotranspiration ( $ET_{o\text{ green}}$ ) and crop coefficients. The  $ET_{o\text{ green}}$  was estimated, using a model based on solar radiation inside the greenhouse, using the weekly meteorological forecast provided by the Spanish Meteorology Agency (AEMET in Spanish). The comparison between estimated values from weather forecasting and those obtained using meteorological measurements was made weekly, as a quality indicator of information provided to the farmers.



## 1- Introducción

España es el tercer mayor productor de fresas a nivel mundial. Se trata de un cultivo generador de alto valor añadido y empleo. Sin embargo, el hecho de que una de sus zonas importantes de cultivo esté situada en las inmediaciones del Parque Nacional de Doñana, el humedal protegido más importante de Europa, requiere la conciliación de la conservación del medio ambiente y esta actividad productiva.

A pesar del uso generalizado del riego localizado para el cultivo de la fresa en la provincia de Huelva, existe mucha incertidumbre sobre la eficiencia del mismo y sobre las dotaciones óptimas de agua para el riego. Estas dotaciones no tienen por qué suponer una merma de las producciones, y sí un ahorro de agua que favorezca la sostenibilidad del cultivo y su compatibilidad con el medio natural. Hasta hace muy pocos años la mayoría de los trabajos existentes sobre el riego de la fresa se habían realizado en California y Florida (EEUU), fundamentalmente con cultivo al aire libre (Clark y col., 1996; Grattan y col., 1998; Hanson y Bendixen, 2004; Trout y Gartung, 2004). Esta situación no coincide con la que se da actualmente en la provincia de Huelva, donde la práctica totalidad del cultivo se realiza bajo plástico con invernaderos del tipo macrotúnel (Figura 1). Además, la baja capacidad de almacenamiento de agua en los suelos arenosos predominantes en muchas zonas de cultivo (por ejemplo, en los municipios de Almonte y Moguer) hace necesaria una programación del riego a escala diaria. Por tanto, un conocimiento del riego a aplicar diariamente, en función de las condiciones meteorológicas futuras, se hace necesario como complemento de otras herramientas de manejo del riego, como puede ser el uso de sondas de humedad del suelo para controlar el riego.




**Figura 1.** Parcela con cultivo de fresa bajo macrotúnel en Moguer (Huelva). Vista exterior (izquierda) y vista interior (derecha).

Dentro de las actividades que el Sistema de Asistencia al Regante (SAR) adscrito al Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera (IFAPA) realiza en el ámbito del regadío andaluz, se está trabajando para mejorar el uso y gestión del agua en el cultivo de la fresa. El SAR ofrece recomendaciones de riego semanales para diferentes cultivos en Andalucía. Este es un servicio sujeto a un proceso de mejora continua. El cultivo de la fresa en Huelva presenta unas características especiales y es preciso mantener un nivel adecuado de humedad en el suelo, por lo que se requiere aplicar riegos de alta frecuencia. Por todo ello, se ha considerado necesario realizar las recomendaciones de riego basadas en una predicción meteorológica objetiva como la proporcionada por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), que proporciona información, entre otros, sobre condiciones de nubosidad, probabilidad de lluvia, temperatura máxima y mínima, humedad relativa del aire y, además, dirección y velocidad del viento (Figura 2).

En definitiva, a partir de la información disponible en la bibliografía y con los resultados experimentales obtenidos en los trabajos previos realizados por el IFAPA, tanto de caracterización del cultivo como de ensayos en campo, se ha puesto a punto una metodología para elaborar las recomendaciones de riego del cultivo de la fresa en la provincia de Huelva. La primera fase de este trabajo se ha llevado a cabo en las condiciones de cultivo de la costa, en la zona de Almonte y Moguer.

Capital: Almonte (altitud: 75 m)  
 Latitud: 37° 15' 45" N - Longitud: 8° 31' 2" O - Posición: [Ver localización](#) ▶  
 Zona de avisos: Litoral de Huelva

Descargar XML de la predicción detallada de Almonte 

Fecha	mar 14		mié 15				jue 16		vie 17		sáb 18	dom 19	lun 20
	12-18	18-24	0-6	6-12	12-18	18-24	0-12	12-24	0-12	12-24			
Estado del cielo													
Prob. precip.	25%	75%	60%	95%	90%	60%	75%	5%	0%	0%	5%	25%	5%
Cota nieve prov. (m)													
Temp. mín./máx. (°C)	13 / 25			12 / 20			10 / 21		9 / 24		10 / 21	8 / 21	9 / 24
Sen. térm. mín./máx. (°C)	13 / 25			12 / 20			10 / 21		8 / 24		8 / 21	7 / 21	8 / 24
Hum. rel. mín./máx. (%)	45 / 100			60 / 100			50 / 100		45 / 95		40 / 70	35 / 80	40 / 85
Viento (km/h)	↑ 30	↖ 5	↖ 5	↑ 15	↑ 20	↗ 10	→ 10	↗ 15	↓ 10	→ 10	↘ 10	↘ 10	↙ 10
Racha máx. (km/h)	50			35									
Temp. (°C)	19	14	13	18	17	13							
Sen. térmica (°C)	19	14	13	18	17	13							
Humedad relativa (%)	65	100	100	80	75	100							
Índice UV máximo	6			5			6		6		6		
Avisos Litoral de Huelva													
	Sin Riesgo ▶			Sin Riesgo ▶			Sin Riesgo ▶						

**Figura 2.** Ejemplo de predicción meteorológica semanal proporcionada en su página Web por la Agencia Estatal de Meteorología para el municipio de Almonte, en la provincia de Huelva.

## 2- Necesidades de agua del cultivo

El método más usual para estimar la evapotranspiración de los cultivos ( $ET_c$ ) es el recomendado por la FAO (Doorenbos y Pruitt, 1977). Este método utiliza las variables meteorológicas para estimar la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) y corrige, posteriormente, este valor mediante un adecuado coeficiente de cultivo ( $K_c$ ).

El valor estandarizado de la  $ET_0$  ha sido definido en el Manual de Riego y Drenaje nº 56 de la FAO para cultivos al aire libre (Allen y col., 1998). Para cultivos en invernadero no se dispone de un método estandarizado, debido, en gran parte, a la variabilidad geométrica de los invernaderos y a las diferencias de los materiales de cobertura usados. Sin embargo, la metodología basada en la estimación de  $ET_0$  y coeficientes de cultivo puede también ser aplicada en invernadero (Bonachela y col., 2006). El trabajo más completo de comparación de métodos para la estimación de la  $ET_0$  en invernadero ha sido el realizado por Fernández y col. (2010) para invernaderos con cultivos hortícolas en la provincia de Almería.

En la actualidad existen redes de estaciones meteorológicas automáticas que suministran registros medios diarios de las diferentes variables meteorológicas y de la  $ET_0$ . Tal es el caso de la Red de Información Agroclimática (RIA) de Andalucía, gestionada por el IFAPA, cuya información está disponible de manera gratuita en Internet. Esta red dispone, además, de varias estaciones en condiciones de cultivo protegido (Figura 3), dos de ellas en la provincia de Huelva, en los términos municipales de Moguer (en la finca experimental El

Cebollar perteneciente al IFAPA) y Almonte (en una finca comercial cerca de la Aldea de El Rocío).



**Figura 3.** Estación meteorológica instalada dentro de un invernadero del tipo macrotúnel con cultivo de fresa.

### 3- Evapotranspiración de referencia

Las recomendaciones de riego se han elaborado siguiendo el método recomendado por la FAO, basado en la evapotranspiración de referencia ( $ET_o$ ) y el coeficiente de cultivo ( $K_c$ ). Las variables meteorológicas necesarias para usar este método se han obtenido de las predicciones semanales proporcionadas por la AEMET correspondientes a los municipios de Almonte y Moguer.

Al principio del ciclo de cultivo de la fresa, cuando todavía no se ha llevado a cabo el forzado del cultivo (tarea que en la zona en estudio se hace normalmente a mediados de noviembre), la estimación de la  $ET_o$  al aire libre se ha realizado aplicando la ecuación de Penman-Monteith FAO-56 (Allen y col., 1998). Esta ecuación necesita datos de: temperatura y humedad relativa del aire, velocidad del viento y radiación solar. Las tres primeras de estas variables se han obtenido directamente de la predicción meteorológica de la AEMET (Figura 2). La radiación solar se ha estimado a partir de las temperaturas pronosticadas, utilizando la ecuación de Hargreaves (Hargreaves y Samani, 1982) (Ecuación 1):

$$R_s = K_r \times (T_{\max} - T_{\min})^{0.5} R_a \quad (1)$$

Donde,  $R_s$  es la radiación solar incidente ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ );  $T_{\max}$  y  $T_{\min}$  son las temperaturas diarias máximas y mínimas del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ) basadas en el pronóstico meteorológico, respectivamente;  $R_a$  es la radiación extraterrestre ( $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ), que se calcula para cada día del año en función de la latitud (Allen y col., 1998); y  $K_r$  es un coeficiente empírico (adimensional). Hargreaves (1994) recomienda el uso de valores  $K_r$  de 0,16 y 0,19 para las localizaciones de interior y costeras, respectivamente. En este trabajo se ha utilizado un valor ajustado de 0,18 (Estévez y col., 2012). Además, se ha estimado el valor de la radiación solar en condiciones de cielo despejado ( $R_{so}$ ) (Allen y col., 1998). Este valor se ha

utilizado como el límite superior del valor de  $R_s$  resultante de la Ecuación 1. Además, cuando el pronóstico meteorológico de la AEMET ha sido de cielo despejado se ha utilizado directamente este valor, sin necesidad de aplicar la Ecuación 1.

Para estimar la  $ET_o$  bajo el plástico del macrotúnel ( $ET_{o\text{ inv}}$ ) se ha utilizado un modelo basado en la radiación solar dentro de los túneles (Fernández y col., 2010), obtenido para los invernaderos de la provincia de Almería (Ecuaciones 2 y 3):

$$\text{Si } DDA < 220 \quad ET_{o\text{ inv}} = (0.288 + 0.0019 \times DDA) \times R_{s\text{ inv}} \quad (2)$$

$$\text{Si } DDA > 220 \quad ET_{o\text{ inv}} = (1.339 + 0.00288 \times DDA) \times R_{s\text{ inv}} \quad (3)$$

Donde, DDA es el día del año, siendo el 1 de enero el día 1 y el 31 de diciembre el día 365; y  $R_{s\text{ inv}}$  es la radiación solar medida o estimada dentro del invernadero (expresada en  $\text{mm día}^{-1}$ ).

En caso de no disponer de medidas de radiación solar dentro de invernadero, su valor puede estimarse a partir de datos de radiación medidos o estimados en el exterior, utilizando un valor de transmisividad que es función, básicamente, del material de cubierta, tipo de cubierta, enclavo, envejecimiento y limpieza del plástico:

$$R_{s\text{ inv}} = R_{s\text{ ext}} \times \tau \quad (4)$$

Donde,  $R_{s\text{ ext}}$  es la radiación solar medida en el exterior y  $\tau$  es la transmisividad de la cubierta.

Los valores de radiación solar medida dentro y fuera del invernadero en la zona de Almonte durante las campañas 2011/2012 y 2012/2013 permitieron ajustar un valor de transmisividad media del plástico ( $\tau$ ) igual a 0,75 para este tipo de invernaderos. Este valor puede ser utilizado en el caso de no disponer de una estación meteorológica dentro del invernadero, como ocurre en la mayoría de los casos.

Los valores de  $ET_o$  basados en el pronóstico se han podido ir comparando, posteriormente, cada día, con los valores obtenidos a partir de los datos meteorológicos medidos en las estaciones de la RIA bajo plástico (Figura 3).

Para la campaña 2013/2014, los resultados obtenidos por Gavilán y col. (2014b) en una finca comercial situada en el T.M. de Almonte, pusieron de manifiesto que el método usado para la estimación de la  $ET_{o\text{ inv}}$  proporcionó resultados similares usando datos meteorológicos medidos y pronosticados (Tabla 1). Solo al final de la campaña, a partir del mes de mayo, la  $ET_{o\text{ inv}}$  estimada con valores pronosticados superó a la correspondiente a valores medidos. Esto pudo deberse a una sobrestimación de la  $R_{s\text{ inv}}$ , derivada probablemente del envejecimiento del plástico y la acumulación de polvo sobre el mismo, lo que pudo haber disminuido la transmisividad del plástico.

Los valores estacionales de  $ET_{o\text{ inv}}$  fueron iguales a 371 y 334 mm usando el pronóstico de la AEMET y usando datos meteorológicos medidos, respectivamente (Tabla 1). Por tanto, la utilización del pronóstico sobrestimó el valor de  $ET_{o\text{ inv}}$  en un 11%. Por su parte, los valores estacionales de  $ET_{c\text{ inv}}$  fueron iguales a 262 y 234 mm usando el pronóstico de la AEMET y usando datos medidos, respectivamente. Según esto, la utilización del pronóstico sobrestimó el valor de  $ET_{c\text{ inv}}$  en un 12%.

**Tabla 1.** Valores mensuales de evapotranspiración de cultivo de la fresa ( $ET_{c\text{ inv}}$ ) usando valores de evapotranspiración de referencia ( $ET_{o\text{ inv}}$ ) estimados con el modelo de radiación a partir de datos pronosticados y medidos, y utilizando el coeficiente de cultivo propuesto por Trout y Gartung (2004), en una finca ubicada en Almonte. Campaña 2013/2014.

Mes	Datos pronosticados		Datos medidos	
	$ET_{o\text{ inv}}$ (mm)	$ET_{c\text{ inv}}$ (mm)	$ET_{o\text{ inv}}$ (mm)	$ET_{c\text{ inv}}$ (mm)
Noviembre	25	8	24	8
Diciembre	27	13	27	13
Enero	27	17	25	16
Febrero	38	25	34	23
Marzo	79	54	71	49
Abril	104	77	91	68
Mayo	71	66	62	57
<b>Campaña</b>	<b>371</b>	<b>262</b>	<b>334</b>	<b>234</b>

#### 4- Coeficientes de cultivo

El coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) ha sido determinado para numerosos cultivos al aire libre (Doorenbos y Pruitt, 1977; Allen y col., 1998). Sin embargo, se han realizado pocos estudios para determinar este  $K_c$  para la fresa, tanto al aire libre como bajo plástico. Hanson y Bendixen (2004) presentan valores de  $K_c$  para la fresa en el estado de California, en condiciones de cultivo al aire libre, con un ciclo de cultivo desde finales de octubre hasta finales de junio, y llegando a coberturas máximas del terreno que varían entre el 65 y el 75%. Se observa que el máximo no sobrepasa el valor de 0,7. Jackson (1992) presenta igualmente valores máximos de  $K_c$  de 0,7 para coberturas máximas del 75%. Igualmente bajo plástico, Simonne y col. (2007) presentan valores de  $K_c$  que varían desde 0,4 hasta un máximo de 0,6 en los meses de diciembre y enero, fecha en que comienza la cosecha, pasando por un valor intermedio de 0,5 durante el mes de noviembre. Finalmente, el manual FAO-56 de Riego y Drenaje (Allen y col., 1998) presenta valores máximos de este  $K_c$  de 0,85.

Recientemente se han realizado estudios para estimar el  $K_c$  de la fresa bajo plástico en las condiciones de cultivo de la costa de Huelva, donde predominan los suelos arenosos. Desde la campaña 2011/2012 el IFAPA realiza estudios orientados a conocer las necesidades de riego del cultivo de la fresa para asesorar a los agricultores en un manejo más eficiente del agua de riego (Gavilán y col., 2014a; Lozano y col., 2014; Molina y col., 2014). Estos estudios han incluido la medida de la  $ET_c$  y la estimación del  $K_c$ , la determinación de la eficiencia del riego y el cálculo de la productividad del agua.

En el presente trabajo se han utilizado los valores de  $K_c$  recomendados por Hanson y Bendixen (2004), que alcanzan valores máximos de 0,7 al final de la campaña, cuando los valores de cobertura máxima del cultivo llegan al 75%. Para coberturas mayores se ha utilizado el coeficiente propuesto por Trout y Gartung (2004). Conviene recordar que la cobertura es la relación entre la superficie sombreada por el cultivo y la superficie total de suelo.

#### 5- Cálculo de las necesidades de riego

Una vez determinadas las necesidades de agua de la fresa como se ha descrito en el apartado anterior, para el cálculo de las necesidades de riego bruto hay que tener en cuenta, como es sabido, la eficiencia de aplicación del riego (% del agua aplicada que es







almacenada en el entorno de las raíces y utilizada por las plantas) y la uniformidad de distribución del sistema de riego. Esta última información se debe caracterizar en las zonas de cultivo.

Las cintas de goteo, que se instalan en el mismo momento del alomado del terreno, utilizadas en Huelva están clasificadas según el espesor y la durabilidad de las mismas. Los caudales medios de las cintas de goteo oscilan entre 3 y 15 l h<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>, con emisores cada 0,2 ó 0,3 m.

Durante la campaña 2014/2015, el SAR ha ofrecido semanalmente recomendaciones de riego para fresa en la zona de Almonte y Moguer basadas en la predicción meteorológica (Figura 4). Para calcular el Riego Bruto se ha considerado un sistema de riego localizado con una Eficiencia de aplicación (E<sub>a</sub>) del 85%. Por su parte, el tiempo de riego se ha calculado tomando como referencia una cinta de goteo de 5 l h<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup> por lomo, y para una distancia entre lomos de 1,1 m. Para valores de Tiempo de Riego diario superiores a 15 minutos, se ha recomendado siempre aplicar dos o más pulsos de riego en las horas centrales del día, con una duración máxima de 10-15 minutos para cada pulso.

**RECOMENDACIONES SEMANALES DE RIEGO PARA FRESA EN LA COMARCA  
 CONDADO LITORAL**

Periodo: 1 al 7 de abril de 2015. Provincia: Huelva. Municipios: Almonte y Moguer.  
 Estación meteorológica de referencia de la AEMET: Almonte.

FECHA	ESTADO DEL CIELO Pronóstico	ET <sub>o</sub> (mm)	RIEGO BRUTO (mm)	TIEMPO DE RIEGO * (minutos)	TIEMPO DE RIEGO PARA CIELO DESPEJADO (minutos)
01/04/2015		3,7	3,0	40	40
02/04/2015		3,4	2,8	37	41
03/04/2015		3,5	2,9	39	41
04/04/2015		3,6	2,9	39	42
05/04/2015		3,5	2,9	38	42
06/04/2015		3,1	2,5	34	43
07/04/2015		4,0	3,3	43	43

\* Los valores propuestos de tiempo de riego se han ajustado con criterios prácticos para facilitar el manejo del riego.

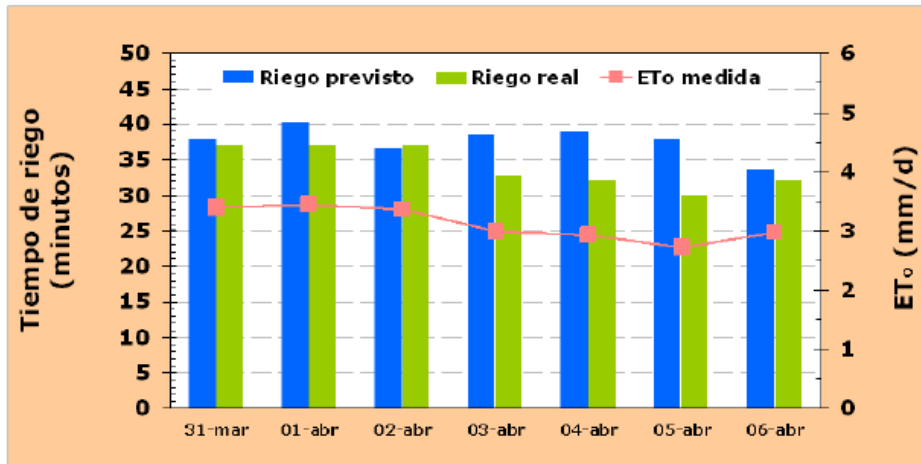
**Figura 4.** Ejemplo de recomendación semanal de riego para el cultivo de la fresa en los municipios de Almonte y Moguer (Huelva), basada en el pronóstico meteorológico de la AEMET. Esta recomendación incluye la predicción de ET<sub>o</sub>, el Riego Bruto y el Tiempo de Riego.

Al igual que se ha comentado para la ET<sub>o</sub>, los valores recomendados de Riego Bruto y Tiempo de Riego se han podido ir comparando, posteriormente, con los valores obtenidos a partir de los datos meteorológicos medidos en las estaciones de la RIA (Figura 5). Dicha comparación ha resultado muy útil para obtener un indicador de la calidad de estas recomendaciones de riego basadas en la predicción.



**COMPARACIÓN DEL TIEMPO DE RIEGO EN LAS RECOMENDACIONES SEMANALES  
 PARA FRESA EN LA COMARCA CONDADO LITORAL**

Periodo: 31 de marzo al 6 de abril de 2015. Provincia: Huelva. Municipios: Almonte y Moguer. Estación meteorológica de referencia: Almonte.



**Figura 5.** Ejemplo de comparación entre el tiempo de riego estimado en función del pronóstico meteorológico y el calculado a partir de los datos meteorológicos medidos dentro de invernadero para el cultivo de la fresa, en los municipios de Almonte y Moguer (Huelva).

## 6- Divulgación de las recomendaciones de riego

El IFAPA ha desarrollado y gestiona una Plataforma en Internet para el asesoramiento y transferencia del conocimiento agrario y pesquero, que se denomina SERVIFAPA. Dentro de la página Web de SERVIFAPA, los documentos relacionados con las recomendaciones de riego para fresa se pueden consultar y descargar de manera libre y gratuita en el apartado "Recomendaciones" del sector Riego.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado con el Proyecto Transforma CONECTA-SAR (PP.TRA.TRA201300.10), cofinanciado por el Programa Operativo Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) Andalucía 2007-2013.

## 7- Bibliografía

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO irrigation and drainage paper 56. FAO, Roma.
- Bonachela, S., González, A.M., Fernández, M.D. (2006). Irrigation scheduling of plastic greenhouse vegetable crops based on historical weather data. Irrigation Science 25(1):53-62.



- Clark, G.A., Albrechts, E.E., Stanley, C.D., Smajstrla, A.G., Zazueta, F.S. (1996). Water requirements and crop coefficients of drip-irrigated strawberry plants. *Transactions of ASAE* 39(3):905-913.
- Doorenbos, J., Pruitt, W.O., 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 24. FAO, Rome.
- Estévez, J., Padilla, F.M.L., Gavilán, P. (2012). Evaluation and regional calibration of solar radiation prediction models in Southern Spain. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 138, No. 10: 868-879.
- Fernández, M.D., Bonachela, S., Orgaz, F., Thompson, R., López, J.C., Granados, M.R., Gallardo, M., Fereres, E. (2010). Measurement and estimation of plastic greenhouse reference evapotranspiration in a Mediterranean climate. *Irrigation Science* 28:497-509.
- Gavilán, P., Lozano, D., Ruiz, N., (2014a). El riego de la fresa en el entorno de Doñana. Evapotranspiración, coeficientes de cultivo y eficiencia del riego. XXXII Congreso Nacional de Riegos. Madrid, 10 al 12 de junio de 2014.
- Gavilán, P., Lozano, D., Ruiz, N., (2014b). Estimación de la evapotranspiración del cultivo de la fresa basada en pronósticos meteorológicos. Validación con datos experimentales. V Jornadas de Agrometeorología. Encuentro Nacional de Servicios de Asesoramiento al Regante. Valencia, 13 y 14 de noviembre de 2014.
- Grattan, S.R., Bowers, W., Dong, A., Snyder, R.L., Carrol, J.J., George, W. (1998). New crop coefficients estimate water use of vegetables, row crops. *California Agriculture* 52(1):16-21.
- Hanson, B., Bendixen, W. (2004). Drip irrigation evaluated in Santa Maria Valley strawberries. *California Agriculture* 58(1):48-53.
- Hargreaves, G. H. (1994). "Simplified coefficients for estimating monthly solar radiation in North America and Europe." Dept. of Biology and Irrigation Engineering Paper, Utah State Univ., Logan, UT.
- Hargreaves, G. H., and Samani, Z. A. (1982). Estimating potential evapotranspiration. *J. Irrig. Drain. Eng. ASCE*, 108(3), 225–230.
- Jackson, A. (1992). Central Coast Crop Coefficients for Field and Vegetable Crops. California Department of Water Resources, Water Conservation Office. University of California (UC).
- Lozano, D., Ruiz, N., Gavilán, P. (2014). Evaluación de la uniformidad de distribución de cintas de riego en condiciones de campo en una producción comercial de fresa en Almonte (Huelva). Eficiencia en el uso del abonado. XXXII Congreso Nacional de Riegos. Madrid, 10 al 12 de junio de 2014.
- Molina, F., Gavilán, P., Lozano, D., Ruiz, N. (2014). Seguimiento para la optimización de la fertirrigación de la fresa en la provincia de Huelva. Eficiencia en el uso del abonado. XXXII Congreso Nacional de Riegos. Madrid, 10 al 12 de junio de 2014.



- Simonne, E.H., Dukes, M.D., Haman, D.Z. (2007). Principles and practices of irrigation management for vegetables. University of Florida. IFAS Extension. Cooperative Extension Service.
- Trout, T.J., Gartung, J. (2004). Irrigation water requirements of strawberries. *Acta Horticulturae* 664:665-671.



## HERRAMIENTA MULTICRITERIO BASADA EN FUNCIONALIDADES SIG PARA LA IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS POTENCIALES DE RIEGO EN ARGENTINA

*Hidalgo García, M. (1) (P), Loyola, L (2), López, C. (3), Zunino, F. (4), Valle Vila, B. (5), San Sebastián Sauto, J. (6) Hierro Rodríguez, R. (7)*

<sup>1</sup> Jefe de Grupo de Actuaciones y Proyectos, Gerencia de Ingeniería y Edificación (Tragsatec), Julián Camarillo 6, 28037 Madrid, [mhg@tragsa.es](mailto:mhg@tragsa.es)

<sup>2</sup> Oficial de apoyo a las inversiones en América Latina en FAO, [Luis.Loyola@fao.org](mailto:Luis.Loyola@fao.org)

<sup>3</sup> Consultora de inversiones en FAO, [Celia.Lopez@fao.org](mailto:Celia.Lopez@fao.org)

<sup>4</sup> Consultor Senior, Argentina, [florzunino@gmail.com](mailto:florzunino@gmail.com)

<sup>5</sup> Responsable de actuaciones y proyectos, Gerencia de Ingeniería y Edificación (Tragsatec), Julián Camarillo 6, 28037 Madrid, [bvv@tragsa.es](mailto:bvv@tragsa.es)

<sup>6</sup> Jefe de Actuaciones y Proyectos, Gerencia de Ingeniería y Edificación (Tragsatec), Julián Camarillo 6, 28037 Madrid, [jsss@tragsa.es](mailto:jsss@tragsa.es)

<sup>7</sup> Técnico Superior en Sistemas de Información Geográfica, Gerencia de SIG y Consultoría (Tragsatec), Julián Camarillo 6, 28037 Madrid, [rhr@tragsa.es](mailto:rhr@tragsa.es)

### Resumen

La FAO encargó a Tragsatec el diseño y desarrollo de una herramienta para la identificación de áreas potenciales de riego en Argentina en noviembre de 2013. En una primera fase se propusieron objetivos e indicadores basados en la sostenibilidad de 5 bloques temáticos (técnico-agronómico, ambiental, económico, social e institucional). Tras la recopilación de mapas, tablas y estudios enviados desde Argentina, estos datos se trataron para su uso como material capaz de establecer una priorización para la puesta en riego basado en un índice potencial de riego (IPR). Este IPR es un número entre 0 y 1 que se ha utilizado para establecer una leyenda común tanto para capas raster originales como a resultados. Una vez establecida la funcionalidad de la herramienta en un entorno Arcmap se realizaron los 5 cruces temáticos para valorar la pertinencia de los resultados. Posteriormente, se probaron combinaciones multicriterio. Se plantean una serie de conclusiones y recomendaciones sobre el uso de una herramienta informática multiparamétrica para la planificación de regadío.

### Abstract

In 2014 FAO ordered Tragsatec the design and development of a decision making tool for locating potential areas to be put under irrigation in Argentina. During the first phase, there was a proposal of some goals and indicators based on the sustainability of 5 key issues (technical-agronomic, environmental, economic, social and institutional). After the collection of maps, tables and studies sent from Argentina, these data were treated to be used as a material capable of establishing a prioritization for the development of irrigation based on a potential rate of irrigation (IPR). This rate is a number between 0 and 1 which has been used to set a common legend as much for the source raster layers as for the resulting maps. Once the tool functionality in an Arcmap interface was checked, all 5 thematic layer crosses were carried on to assess the relevance of the results. Subsequently, multi-criteria combinations were tested too. To conclude, a series of conclusions and recommendations on the use of a multi-parameter computer tool for irrigation planning are anticipated.

## 1 Introducción

La FAO y el Programa de Servicios Agrícolas Provinciales de Argentina (PROSAP) cuentan con un acuerdo orientado a mejorar la eficiencia sectorial agropecuaria y las condiciones de vida de los pequeños y medianos productores mediante el incremento de las inversiones agropecuarias nacionales y regionales. Dentro de este marco, la FAO contrató en 2014 a Tragsatec para la definición de una metodología multidisciplinar para la identificación de potenciales áreas de riego complementario con el objeto de conseguir una herramienta multicriterio capaz de cruzar información gráfica de diversa índole.

Para poder dar una visión generalizada sobre el riego en Argentina se pueden ofrecer una serie de datos relevantes sobre su situación actual.

- La República Argentina cuenta con 174 Mha cultivables de las que se cultivan 39 Mha (22,4%).
- La superficie actual regada con agua superficial abarca 1,35 Mha, con agua subterránea 0,4 Mha y con agua complementaria mixta suman 0,6 Mha. En Mendoza se riegan 13.000 ha con recursos reutilizados. El sistema de gravedad alcanza el 83%, la aspersión el 12% y el localizado el 5%. El 14% de la superficie es pública. La eficiencia media es de 35-40%. El riego integral se da en la zona árida y el complementario en la semiárida del país.
- La superficie potencial de riego, basada en la superficie sin limitaciones y la disponibilidad de agua, se ha estimado en 16 Mha. Se prevé una ampliación a 7 Mha en los próximos 10 años.
- El sector agrícola consume 27,93 km<sup>3</sup> (74%). Las aguas subterráneas suponen sólo el 30% pero son claves en regulación pluri e interanual y en sequías.
- La República cuenta con 41 M de habitantes. Un 7% es población rural. Población activa rural de 1,4 M hab. con sólo un 11% femenino. La fuente de abastecimiento de la población rural en zonas áridas es la subterránea.
- Los problemas de calidad en superficiales proceden de la erosión, plaguicidas, mala depuración, pozos ciegos o contaminación industrial. Existe una alta contaminación natural por As, F y Va. Las subterráneas sufren de malas prácticas y fallos de saneamiento. La red de seguimiento cuenta con 105 estaciones. Inundaciones cada vez más frecuentes. 30- 40% con problemas de salinización-sodificación.

La finalidad del trabajo era obtener resultados gráficos como sistema de apoyo a la decisión con información significativa sobre la potencialidad de regadío por zonas según la información y criterios establecidos previamente.

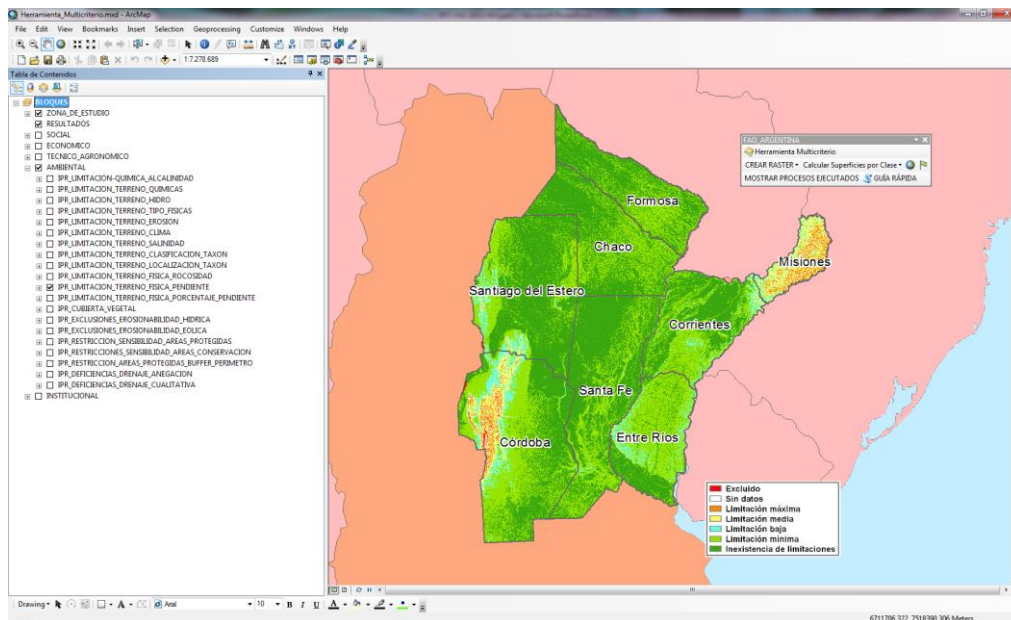
## 2 Diseño y desarrollo de la herramienta

Durante el periodo de diciembre de 2013 y enero de 2014 se fueron realizando diferentes envíos digitales a España para comenzar los trabajos de revisión y posterior incorporación al diseño de la herramienta. Se organizó un equipo de trabajo que contara con personal que analizara la información cartográfica y que por otro lado comenzara a proponer objetivos e indicadores viables. En Junio de 2014 se dio por finalizada la primera fase con la entrega de una versión inicial de la herramienta para la cual se habían puesto en marcha las siguientes actividades:

- Revisión de criterios de partida y objetivos del regadío en Argentina
- Definición de objetivos y consenso de los mismos para obtención de indicadores

- Establecimiento de bloques temáticos
- Recopilación, ordenación y categorización de la información recibida
- Diagnóstico y selección de capas de uso para la herramienta
- Propuesta metodológica de la herramienta en base a un índice potencial para riego (IPR)
- Definición de las bases de funcionamiento de la herramienta multicriterio

Para el desarrollo de la herramienta se ha necesitado, por un lado revisar toda la información recibida, establecer una metodología de ponderación y asignación de valores y desarrollar un diseño y su implementación en un entorno SIG que permita manejar dicha información y la obtención de resultados cartográficos (**Ver Figura 1**). Para ello, se analizó toda la información de diferentes estudios temáticos realizados por las diversas empresas y la propia administración argentina en un área delimitada por 8 provincias del Nordeste Argentino.



**Figura 1.** Aspecto general de la Herramienta Multicriterio de suma ponderada de capas raster para priorización de obras de regadío

Una vez organizada la información alfanumérica y cartográfica disponible o cuyo contenido puede someterse a una interpretación de carácter agrario sobre su potencialidad al regadío, se proponen 101 capas englobadas en 5 bloques temáticos: que puedan llegar a combinarse para evaluar la selección de áreas prioritarias para riego:

- Bloque Técnico-Agronómico
- Bloque Ambiental
- Bloque Social
- Bloque Económico
- Bloque Institucional

De esta forma y en base a la combinación de distintos factores, disponibilidad de capas cartográficas, datos alfanuméricos, limitaciones del riego, efectos potenciales y objetivos de



la herramienta se ha calculado un denominado ÍNDICE POTENCIAL PARA RIEGO (IPR) para distintos indicadores.

Finalmente, se ha realizado una implementación personalizada de un Sistema de Información Geográfica. Se ha optado por ArcGis versión 10.1 y programación en Python con la que diseñar un interfaz que permite ponderar indicadores (capas), ponderar bloques (todos ellos en base 1 para compensar el uso de un número independiente de capas o bloques en cada combinación) y generar información de áreas potenciales de riego en formato raster con distinto tamaño de celda y cálculo de superficies.

A continuación se desglosan las diferentes tareas más relevantes llevadas a cabo para la puesta a punto de la herramienta

## 2.1 Establecimiento de objetivos por bloques

Como objetivo general del encargo de FAO se plantea el diseño de una metodología multicriterio de priorización para riego. Esta metodología ha de incorporar, por tanto, una serie de criterios compatibles con la política de FAO y el estado Argentino en cuanto a sostenibilidad general del regadío.

Se han establecido 5 bloques, coherentes con los principios de sostenibilidad de la FAO y de la República Argentina, sobre los que la priorización de zonas para su posible puesta en regadío cumpla con:

- Sostenibilidad Técnica: Apuesta por tecnologías agrarias modernas pero asumibles por la población local, adaptando el uso de los recursos y la potencialidad para riego.
- Sostenibilidad Ambiental: Estudio de condiciones ambientales actuales y futuras que garanticen la explotación del riego a medio y largo plazo sin arriesgar los recursos.
- Sostenibilidad Económica: Búsqueda de alternativas con la mayor eficiencia coste/beneficio que permitan un mantenimiento temporal a largo plazo
- Sostenibilidad Social: Fomento del desarrollo social basado en la búsqueda de la equidad y el balance de las desigualdades y una justificación social de las inversiones.
- Sostenibilidad Institucional: Análisis de la viabilidad del fomento del regadío y sometimiento de los proyectos a la legislación vigente estatal y provincial.

## 2.2 Propuesta metodológica para integración de capas en la herramienta multicriterio

Un vez establecida la información alfanumérica y cartográfica disponible sobre los 5 bloques temáticos o cuyo contenido puede someterse a una interpretación de carácter agrario sobre su potencialidad para el regadío, se propone una serie de índices que puedan llegar a combinarse para la obtención de uno o varios indicadores ambientales para la herramienta de selección de áreas prioritarias para riego.

**Tabla 1.** Valoración del IPR para cada indicador y leyenda estándar

CATEGORÍA	IPR
Exclusión de puesta en riego	NULL
Sin dato	0
Limitación máxima para riego	0,01-0,24
Limitación media para riego	0,25-0,49
Limitación baja para riego	0,5-0,74
Limitación mínima para riego	0,75-0,99
Inexistencia de limitaciones	1

De esta forma y en base a la combinación de factores, disponibilidad de capas cartográficas, datos alfanuméricos, limitaciones teóricas del riego, efectos potenciales y objetivos de la herramienta se ha calculado un denominado ÍNDICE POTENCIAL PARA RIEGO (IPR) para distintos indicadores. Como leyenda general se ha adoptado la siguiente:

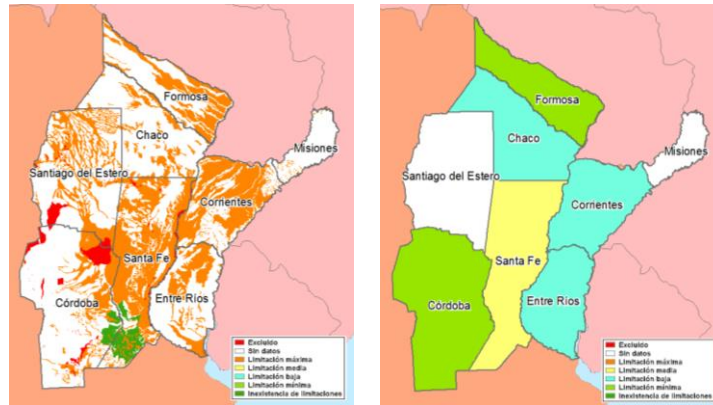
Estos índices van a ser valorados numéricamente de forma que NULL indique la imposibilidad de establecer un proyecto de riego y 0,01 la máxima limitación. Desde dicho índice hasta "1" se gradúa la posibilidad de plantear limitaciones para su establecimiento según las características del parámetro de la capa correspondiente (inundabilidad del suelo, tipo de clima, presencia de población indígena, coste del bombeo a canal...).

Esta numeración debe entenderse en todo momento como un criterio de priorización según el parámetro exclusivo que se haya escogido. La categorización de los estadios intermedios es obviamente la tarea más difícil al incorporar un nivel de subjetividad o el preestablecimiento de ciertas condiciones para decidir los límites entre un valor numérico y el siguiente o el grado de separación entre ambos. Para ello es importante la valoración por distintos expertos y la retroalimentación del sistema hasta llegar a una cartografía que sea capaz de dar una interpretación válida y coherente de la priorización del riego.

Posteriormente, la combinación de diferentes índices y su ponderación relativa permitirá establecer diferentes escenarios para el regadío con mayor o menor incidencia en los aspectos multidisciplinares. Tras esta labor, la coherencia y la representatividad de los datos han de ser contrastadas con experiencias pilotos o con apoyo de expertos argentinos que homologuen las alternativas procedentes de la herramienta.

### 2.3 Trabajo en diferentes niveles de detalle de la cartografía

El nivel de detalle de los datos representados es muy variado, totalmente influenciado por la escala de la información de origen. Por este motivo, el usuario deberá tener en cuenta la escala de los datos que está combinando. Así, los bloques técnico y ambiental, contienen actualmente información mucho más detallada ya que parte de una información en origen a menor escala (local) y con divisiones naturales y los bloques social e institucional parten de una información provincial (**ver Figura 2**). Los económicos se reparten entre ambos tipos según la fuente utilizada en cada caso.



**Figura 2.** Comparativa entre mapa del bloque ambiental (izda.) e institucional (dcha.)

Además, en ocasiones, la cartografía de origen para indicadores iguales (suelos) parece indicar una diferencia de criterio por lo que en el resultado final podrían observarse cortes bruscos no achacables al procesado de la información sino a la información de origen.

### 3 Resultados

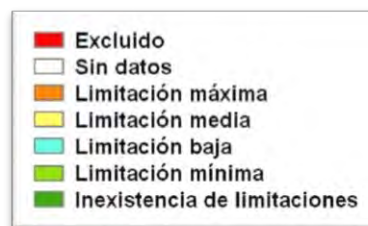
La herramienta SIG estaba realizada inicialmente para el programa ArcMap 10 de ESRI aunque se ha ido actualizando a las versiones 10.1 y 10.2 durante su puesta en marcha. El sistema de proyección adoptado para todas las capas es el POSGAR07. Las bandas de proyección escogidas han sido la 4 para el área de estudio y la 5 para toda Argentina. El programa requiere obligatoriamente contar con la extensión "SPATIAL ANALYST" activa para su ejecución. La escala de trabajo se puede personalizar desde una celda de 90\*90 metros hasta la que se considere, habitualmente 500\*500 metros.

A partir de este trabajo preliminar se ha construido una herramienta multicriterio basada en capas de 5 bloques distintos que permite seleccionar tanto el número de capas como el peso de las mismas. Para ello ha sido necesario establecer una serie de criterios de partida:

- Consta de 5 bloques diferenciados a los que habrá que asignarles un peso cuya suma debe ser igual a 1.
- Las capas raster están clasificadas en los 5 bloques ya mencionados. Se deben seleccionar las capas que vayan a participar en la operación, asignándoles individualmente el peso que tendrán dentro del bloque al que pertenecen. Nuevamente se debe tener en cuenta que la suma de tales pesos debe ser igual a 1.
- Todas las capas han sido interpretadas según criterios de priorización para riego de tal forma que el más idóneo recibía un índice 1 según el criterio para cada índice (el de menor coste, el más rentable, el mejor suelo....) ya fuera cualitativo o cuantitativo.
- En caso de exclusión el valor adjudicado es Null, equivalente a un multiplicador por cero.
- Para los elementos sin dato se adjudica el valor 0.
- Cuando se considera que dentro de ese particular indicador no existe una razón objetiva que limite la puesta en marcha del riego, se adjudica un "1".
- Todas las demás clases se ordenan según su mayor o menor limitación para el desarrollo en riego que va desde 0,99 (el más idóneo o menos limitado para regadío) a 0,01 (el menos regable o más limitado para riego).

- Para las capas cualitativas el índice ha debido ser asignado manualmente, reinterpretando la leyenda en base a la priorización de regadío.
- Para las capas con datos numéricos se han normalizado las series como cocientes del mayor o del menor parámetro, dependiendo del criterio establecido.
- Todos los resultados de la suma ponderada, siguiendo estas bases, darán lugar a una nueva capa a la cual se le podrán aplicar los mismos criterios de partida y leyenda, pues el resultado volverá a encontrarse comprendido entre 0 y 1., independientemente del número de capas o bloques implicados en la consulta.

La aplicación se estructura en 5 bloques temáticos (técnico-agronómico, ambiental, social, económico y jurídico-institucional). Se utiliza una leyenda conjunta tanto para las capas individuales como para el resultado de las mismas con una simbología preestablecida, de 7 clases según el método de corte preestablecido (**Figura 3**).



**Figura 3.** Leyenda única para Índice Potencial para Riego (IPR)

La herramienta incluye asociada a cada una de las capas un informe donde se documentan las fuentes, criterio de priorización y método de cálculo. Actualmente, para que la herramienta “suma ponderada” sea operativa, deben tenerse en cuenta las siguientes premisas ineludibles:

- Cuenta con un sencillo control de errores de suma de pesos. El usuario es avisado con un icono y un mensaje de atención que se deben dar los pesos de modo que sumen 1 entre bloques y entre capas dentro de cada bloque.
- Cada bloque debe tener una capa seleccionada al menos. En caso de no querer que un bloque participe en el proceso se le debe dar valor “0”.
- Se debe tener en cuenta que la lista de capas se ha cerrado para agilizar la gestión de datos, pero sigue siendo posible añadir capas externas. Para ello se ha habilitado un botón “+” que permitiría añadir otras capas.
- Dentro de cada bloque se deben seleccionar sólo las capas que se quieren usar en la combinación y es opcional deseleccionar el resto con el botón “X” que aparece a la izquierda del listado de capas para limpiar la vista, dejando solo las participes en la suma.
- En caso de querer dejar un bloque entero sin operar se debe indicar “0” en el peso del bloque. De este modo, las capas seleccionables quedan bloqueadas para su selección.
- No se debe cambiar el nombre de cualquier dato que participe (Carpeta, geodatabase, clase de entidad, tabla, capa raster...) o la herramienta no funcionará.

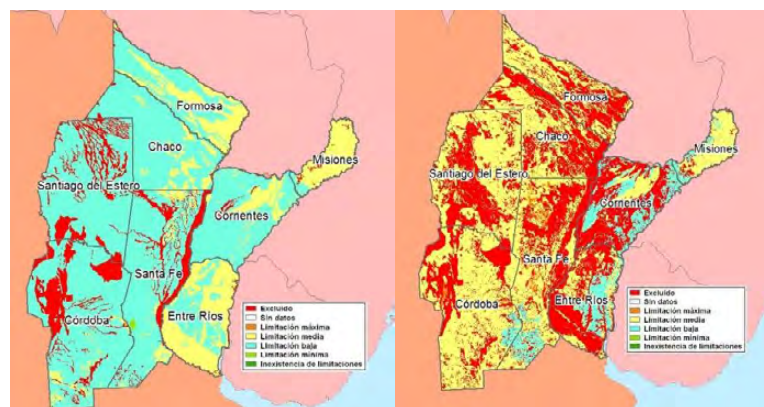
De cara al manejo por parte de un usuario básico del programa se ha redactado una guía visual que sirva para la rápida inmersión en el funcionamiento. El contenido de botones, su funcionamiento y características son comentados paso a paso.

### 3.1 Escenarios temáticos

Antes de pasar a usar la herramienta para la elaboración de mapas con escenarios complejos de combinaciones de bloques y capas con diferentes pesos se procedió a analizar la información por bloques temáticos para valorar su coherencia interna. Para ello se ha procedido a dotar a cada capa del mismo peso y operar con ellas de modo que los mapas resultantes muestren los datos según la leyenda común.

Como resultados de estos escenarios por temas (**Figura 4**) se marcan una serie de tendencias que sirven de referencia parcial para poder valorar la pertinencia de las capas y la viabilidad de las combinaciones.

- El uso de IPR permite armonizar el contenido de las tablas y su visualización. El paso previo de capas y tablas originales a capas raster con IPR requiere de un cierto tratamiento de los datos en Arcmap, pero una vez realizado permite una ponderación y una interpretación sencillas al ser independientes del número de capas o bloques utilizados en la sumatoria y el tipo de datos originales.
- La inexistencia o baja representatividad de áreas prioritarias (de limitación nula o máxima) en los mapas combinados no debe interpretarse como una ausencia de áreas preferenciales para riego sino que la suma ponderada va acumulando limitaciones parciales por lo que el análisis debe realizarse de forma comparada en el mapa resultado final como un gradiente de priorización.
- La aplicación del bloque ambiental en conjunto parece proponer una excesiva superficie excluida. Esto puede resolverse mediante una atenuación del peso del bloque en las combinaciones o una revisión de criterios, sobre todo en tablas que, usadas también como fuente en el bloque técnico, éstas se han interpretado aquí de forma más drástica.
- La colaboración de expertos de cada campo en Argentina es de gran relevancia para evaluar la relevancia de la información disponible, y valorar la adecuación de los resultados, al menos a nivel de bloque. También es interesante que se indiquen las nuevas capas de importancia contrastada de las que se carezca en la actual versión y que los especialistas puedan recomendar.







**Figura 4.** Combinación con mismos pesos para todas las capas del bloque (de arriba abajo y de izda a dcha): técnico, ambiental, económico, social e institucional

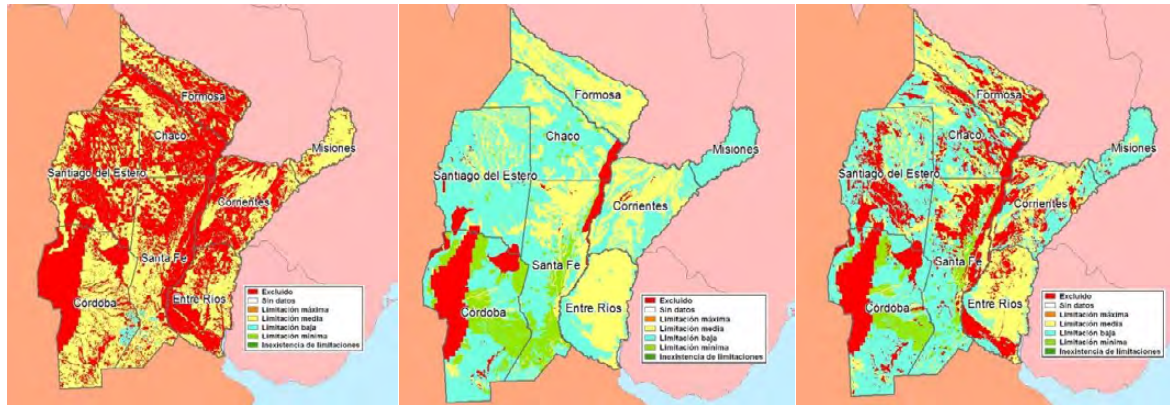
- Los 3 bloques con mayor detalle (Técnico, Ambiental y Económico) muestran áreas comunes: Zonas excluyentes en las Sierras de Córdoba, el valle del Salado en Santiago del Estero y Santa Fe y la ribera derecha del Paraná en Santa Fe y zonas de menor limitación situadas en las vegas Orientales de Córdoba y Santa Fe y Riberas del Río Bermejo y Río Uruguay en Corrientes y Entre Ríos.
- Los bloques social e institucional presentan datos únicamente a nivel provincial.
  - o Santiago del Estero y Formosa parecen inicialmente ofrecer mayores limitaciones sociales que el resto con la limitada información disponible.
  - o Chaco, Santiago del Estero y Santa Fe destacan institucionalmente en conjunto pero Córdoba y Buenos Aires presentan buenas capacidades para 2 de las 3 alternativas cuando se usan los pesos del estudio de partida.
  - o Para el bloque institucional es razonable la falta de mayor detalle por la propia naturaleza de la legislación y difícilmente ampliable por competencias no asumidas por instituciones de menor rango (departamentos o municipios) sobre un tema tan específico como la agricultura de riego.
  - o Para el social sería muy interesante contar con datos desglosados al menos a nivel departamental dado el papel que el riego puede y debe cumplir con el objetivo de desarrollo rural y equidad social.

### 3.1.1 Escenarios globales

Una vez contrastados los resultados obtenidos por la suma ponderada para cada uno de los 5 bloques se pasa a realizar distintas combinaciones múltiples mixtas.

**ESCENARIO GLOBAL EQUITATIVO:** En la primera combinación mostrada (**Figura 5 izquierda**) se ha realizado la suma ponderada de los 5 bloques equiparando los pesos de cada capa. Puesto que un bloque como el ambiental establecía una gran superficie excluida al tiempo que otro como el técnico permitía una baja limitación, la combinación de los 5 bloques muestra una división dicotómica entre excluida y limitación media a partes iguales.





**Figura 5.** Combinación mixtas de 5 bloques con varias capas (de arriba abajo y de izda a dcha): Todas las capas con mismos pesos, escenario A y escenario B

**ESCENARIO A:** En la ponderación seleccionada en el mapa 2 (**Figura 5 centro**) se han escogido entre 1 y 3 capas de cada bloque. Se puede ver que la mayoría de la superficie de la zona de estudio (81%) se enmarca entre la limitación media y baja con una exclusión y una limitación mínima entorno al 9%. Esta combinación sería correspondiente a unos objetivos poco restrictivos donde se aplican ventajas económicas y técnicas del riego con cierta disponibilidad hídrica y pequeños inconvenientes climáticos y ambientales.

**ESCENARIO B:** En la siguiente cartografía (**Figura 5 derecha**) se ha añadido la capa de cubierta vegetal con un peso del 50% a costa de la restricción de espacios protegidos. La exclusión gana así terreno por todas las provincias. El hecho de añadir un criterio más restrictivo como la cubierta vegetal provoca que la exclusión se cuadruple y el resto de limitaciones se vean reducidas en porcentaje. Pese a todo, aún quedarían casi 3,3 Mha dentro de la limitación mínima como áreas de priorización de proyectos de riego.

#### 4 Conclusiones y recomendaciones

Tras describir las principales funciones de la herramienta en su estado de desarrollo actual se plantean unas conclusiones sobre los trabajos llevados a cabo y que sirvan para apuntar la evolución a corto plazo de la aplicación.

- La herramienta facilita una combinación de pesos y selección de capas que permite la evaluación de escenarios multicriterio para la planificación de regadío integral o complementario en la República Argentina de forma tanto gráfica como numérica.
- La herramienta actual presenta una estructura suficientemente sólida para permitir a partir de esta versión su crecimiento tanto en contenido como en posibles funciones.
- Aunque la herramienta está preparada para la incorporación de más capas y diferentes ámbitos de estudio sería recomendable nivelar más los bloques o ámbitos que no poseen un número suficiente de capas raster para poder realizar ponderaciones más equilibradas.
- La aplicación del IPR a diferentes capas interpretables es un trabajo previo a su incorporación a la herramienta, que permite, de una forma sistemática y flexible, multiplicar el número e incluso las variaciones de capas incorporables.
- El IPR aplicado a campos numéricos resulta sencillo si se establece un criterio creciente o decreciente. En el caso de campos discretos la interpretación del IPR

implica ciertos principios menos objetivos y que dependen del grado de conocimiento del campo en cuestión.

- En cuanto a la representación de los datos, la información de partida se presenta a distintos niveles de escala. Durante todo el proceso de valoración, se han tenido en cuenta que los datos tengan presencia en todo el ámbito de estudio, sean mensurables (base 1) y además poligonales para el cálculo de superficies.
- Se recomienda para la actualización de las capas, una escala más detallada que revierta en un incremento de la calidad y fiabilidad en la recopilación de datos, en la valoración cuantitativa y cualitativa final de los mismos.
- La significación de los resultados puede ser comprobada mediante combinaciones temáticas donde resulte más sencillo interpretar los resultados antes de que se realicen combinaciones complejas donde sea más difícil comprender los efectos de la inclusión o no de una capa o la variación de diferentes pesos relativos.
- El apoyo de técnicos especializados en distintos factores del regadío, medio ambiente, la sociedad y la economía y las instituciones es imprescindible para cotejar la correcta interpretación de las leyendas al ser convertidas en IPR y para recomendar nuevas fuentes de información.
- A la hora de establecer los escenarios resulta muy relevante establecer objetivos, puesto que los indicadores sin objetivos sólo son índices. Se recomienda la inclusión de objetivos como paso intermedio en el menú de la selección de capas dentro de cada bloque.
- Se recomienda dotar a la aplicación informática de un nombre propio, basado en un acrónimo o en un concepto de agricultura sostenible, que facilite su divulgación.

## 5 Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado con fondos de la FAO.



## RECARGA GESTIONADA DE ACUÍFEROS: MULTIFUNCIONALIDAD EN LA ZONA REGABLE DE SANTIUSTE

Fernández Escalante, E. <sup>1</sup>, González Herrarte, F.B. <sup>2</sup> y San Sebastián Sauto, J (P)<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Especialista en Planificación y Transferencia Tecnológica, I+D, Gerencia de Planificación Y Transferencia, TRAGSA, [efernan6@tragsa.es](mailto:efernan6@tragsa.es)

<sup>2</sup> Técnico, Gerencia de Planificación y Transferencia, TRAGSA, [fgonza13.ext@tragsa.es](mailto:fgonza13.ext@tragsa.es)

<sup>3</sup> Jefe de Actuaciones y Proyectos, Gerencia de Ingeniería y Edificación, Tragsatec, Grupo TRAGSA, Julián Camarillo 6, 28037 Madrid, [jsss@tragsa.es](mailto:jsss@tragsa.es)

### Resumen

Los dispositivos de recarga gestionada del acuífero de Santiuste (Segovia) dentro de la masa subterránea de Los Arenales llevan en funcionamiento desde 2002. Durante este tiempo se han realizado ampliaciones y modificaciones que han permitido pasar de un sistema puramente hidrogeológico para uso de riego a un dispositivo de gran flexibilidad y creciente multifuncionalidad. En este artículo se muestran las funciones que cumplen los diferentes dispositivos, incidiendo fundamentalmente en los factores ambientales que no aunque no formaban parte del planteamiento original han ganado protagonismo con la evolución del proyecto y su funcionamiento.

### Abstract

*Managed Aquifer Recharge (MAR) facilities of Santiuste within the groundwater body of Los Arenales (Segovia) have been in operation since 2002. During this time there have been additions and modifications that have allowed to move from a purely hydrogeologic scheme for irrigation purpose to a device of great flexibility and increased multifunctionality. This article shows the functions fulfilled by different devices, mainly focusing on the environmental factors that, even though they were not part of the original planning, have gained prominence with the evolution of the project and its operation.*

### 1 INTRODUCCIÓN: OBJETIVO DEL TRABAJO

El acuífero de "Los Arenales" es un inmenso almacén arenoso de agua subterránea de más de 7.754 km<sup>2</sup> ubicado en Castilla y León. Desde mediados del siglo XX, la expansión del regadío condujo a una disminución del nivel de agua subterránea. La alarma saltó en 1992 cuando el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) a través de su red de control constató el descenso de 30 metros en el nivel freático en Madrigal de las Altas Torres.

Por ello, el Ministerio de Agricultura impulsó la instalación de sistemas de recarga gestionada del acuífero en tres zonas piloto: Santiuste, Carracillo y Alcazarén. En 1992 se iniciaron los primeros estudios de viabilidad de recarga en el acuífero de los Arenales a través de la colaboración del Instituto Nacional de Reforma y Desarrollo Agrario (IRYDA) y el propio IGME. Con fecha 14 de Mayo de 1999, y una vez examinado el expediente incoado a instancias del Presidente de la Comunidad de Regantes, la Confederación Hidrográfica del Duero (CHD) resolvió otorgar la concesión de aprovechamiento de aguas superficiales a la CR de Regantes de la Cubeta de San Juan Bautista de 1.000 l/s del río Voltoya con toma en el término municipal de Aldeanueva del Codonal (Segovia) con destino a la recarga del acuífero de la cubeta de Santiuste. En 2000 se aprobó el proyecto original y en 2001 un modificado. Proyecto, obras, seguimiento y posterior vigilancia fueron confiados al Grupo Tragsa.

Los primeros dispositivos se finalizaron un año más tarde, por lo que en 2012 se pudo celebrar una década de funcionamiento de la recarga en la cubeta de Santiuste. En este tiempo transcurrido, el sistema de recarga ha ido evolucionando desde una solución tecnológica con un enfoque inicial estrictamente hidrogeológico para un problema agronómico hasta un complejo sistema multifuncional donde se han ido incorporando nuevos criterios biológicos, químicos, socioeconómicos, administrativos, educativos...

La finalidad del presente trabajo es mostrar las múltiples capacidades de un sistema originalmente ideado para regadío y cómo valorar sus funciones y efectos técnicos, ambientales, económicos y sociales.

## 2 DESCRIPCIÓN DE LOS DISPOSITIVOS DE RECARGA GESTIONADA

Antes de pasar a definir los distintos dispositivos que constituyen el sistema de recarga es necesario dar unas pinceladas sobre las características hidrogeológicas del acuífero, aunque en la realidad el estudio en detalle de este apartado ocupó gran parte del esfuerzo técnico puesto que es fundamental para garantizar la viabilidad de la recarga.

### 2.1 Descripción somera del acuífero de la Cubeta de Santiuste

La Cubeta de Santiuste se extiende por 85 km<sup>2</sup>, limitado por los ríos Voltoya y Eresma por el Este y por afloramientos de baja permeabilidad del Terciario por el Oeste. Pese a su reducido tamaño, se considera un área de gran importancia para el regadío con aguas subterráneas. Los dispositivos de Recarga Gestionada de Acuíferos (MAR por su acrónimo en inglés) aprovechan el antiguo curso del arroyo de la Ermita (**Figura 1**), prácticamente desaparecido tras ser sometido a grandes movimientos de tierra durante las sequías de los últimos 30 años.

La traza del acuífero, según la geofísica (Galán, 2001), transcurre en una orientación de SSE a NNW hacia los dos ríos citados formándose 8 pequeñas cubetas interconectadas con base en el Terciario impermeable y separaciones formadas por afloramientos del mismo y a su vez cubiertas con depósitos de arena de origen eólico y fluvial de potencia variable pero gran trasmisividad (**Figura 2**). Uno de los afloramientos subdivide la zona en 2 mitades Norte y Sur.

### 2.2 Descripción de los dispositivos de recarga

Las obras de recarga en Santiuste se basan en 3 proyectos:

- Obra financiada por el Ministerio de Agricultura: "Proyecto de recarga del acuífero de la cubeta de Santiuste de San Juan Bautista (Segovia)" 2000-2002
- Obra financiada por la Consejería de Agricultura de la Junta de Castilla y León: "Obras de infraestructura en la zona de concentración parcelaria de la cubeta de Santiuste de San Juan Bautista (Segovia)" 2004-2006
- Obras de financiación local: "Acondicionamiento de infraestructuras en los ayuntamientos de Coca y Villeguillo" 2006-2008

La relación topológica e hidráulica entre los diferentes dispositivos descritos se muestran en el esquema de la **Figura 3**.



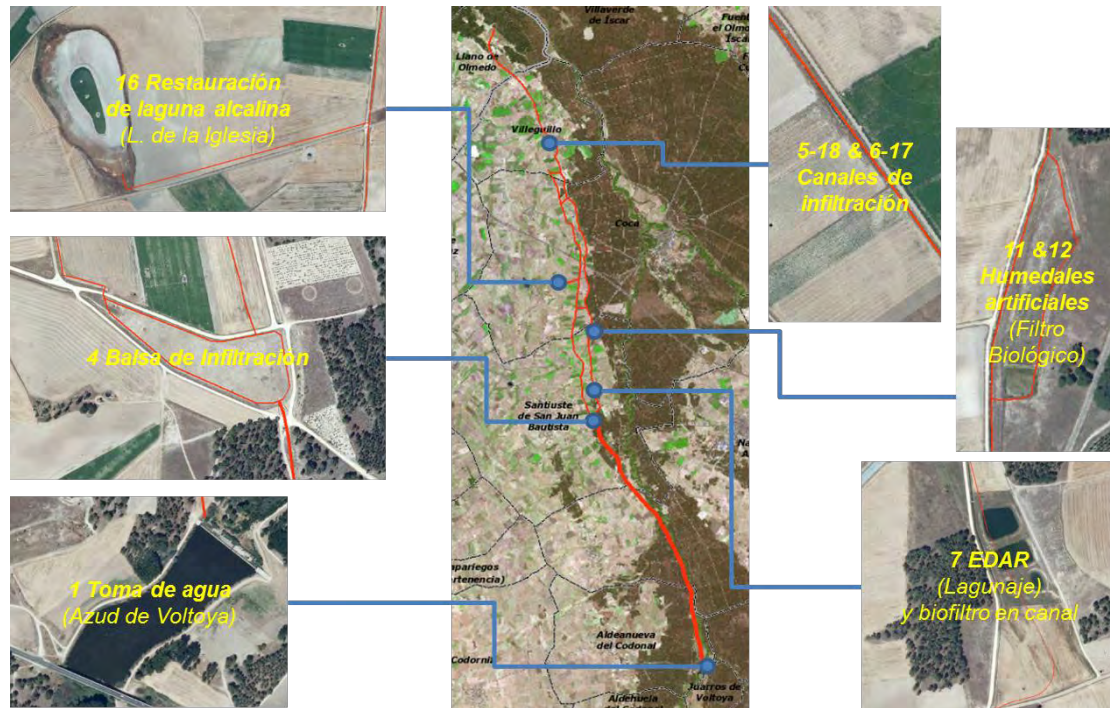


Figura 1. Vista en planta del sistema de recarga de Santiuste sobre ortofoto y principales dispositivos MAR

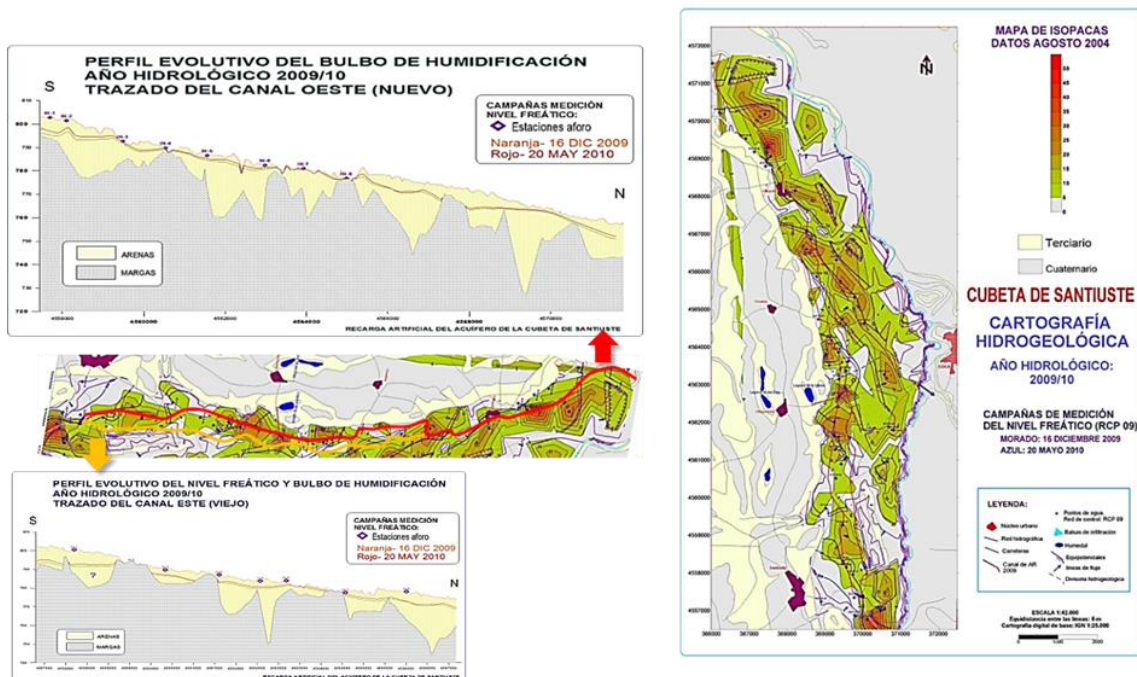


Figura 2. Vista en planta del sistema de recarga de Santiuste. Perfiles del canal Oeste (Caz Nuevo y extensión del Este) y Este (Caz Viejo)

### 2.2.1 Azud del río Voltoya

Azud de planta recta con perfil de vertedero tipo Creagel de 107 m de longitud, 3 m de altura y capacidad para 60.000 m<sup>3</sup>. La toma está diseñada para un caudal máximo de 1 m<sup>3</sup>/s, siempre que se registre un caudal ecológico de la misma cuantía en el caudalímetro del Voltoya en Coca conectado en tiempo real a la Confederación Hidrográfica del Duero. La

concesión dura de noviembre a mayo. La presa tiene un diseño específico con filtros, mecanismos de decantación y sistemas anti-entrada de peces.

### 2.2.2 Tubería de conducción

El agua del río Voltoya es desviada por flujo gravitacional de 816 a 812 m de cota a través de 9,82 km de tuberías enterradas a través del pinar de *Pinus pinaster* hasta el dispositivo de cabecera. La tubería es de poliéster reforzado con fibra de vidrio de 900 mm de diámetro y tiene 16 chimeneas de aireación y 10 desagües en su trayecto. La apertura es manual y la recarga no genera coste energético alguno al circular toda ella por gravedad.

### 2.2.3 Balsa de decantación e infiltración

La cabecera consta de una balsa de 1,4 ha tras un contador de flujo, un sistema de filtrado y algunos pozos de gran diámetro en el extremo sur del acuífero. Consta de un dispositivo de decantación de 36 m<sup>2</sup> con disipador de energía para evitar erosión y burbujeo.

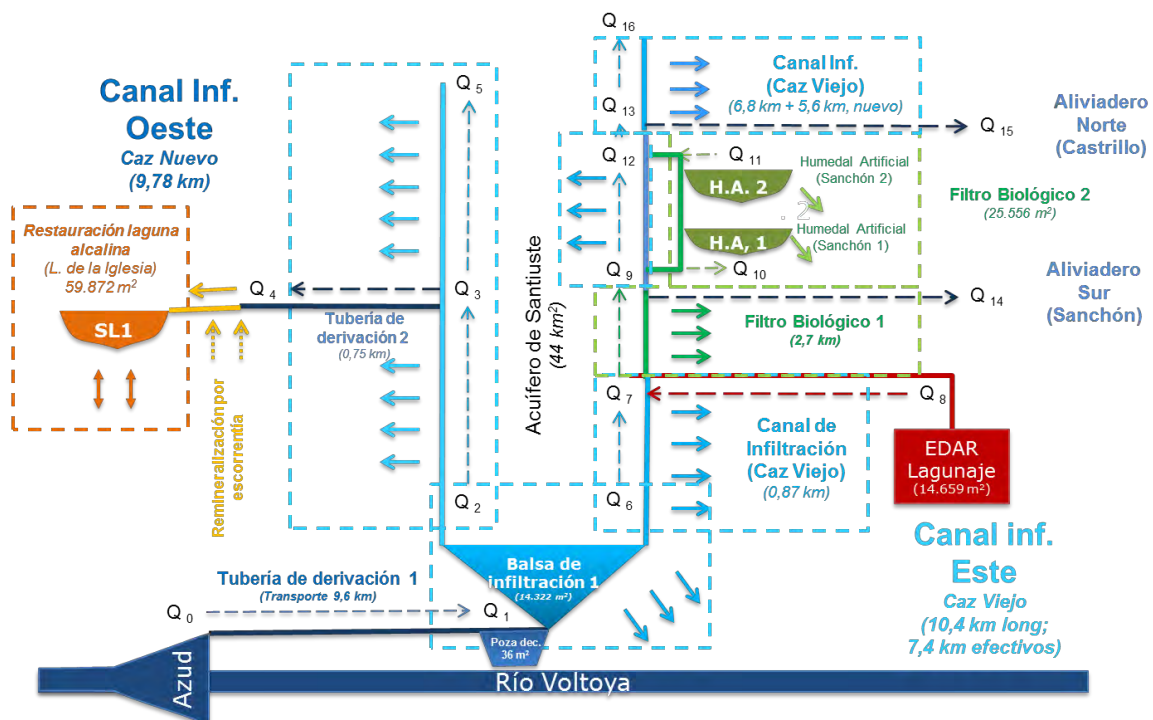


Figura 3. Esquema del sistema de recarga de Santiuste. Principales dispositivos y caudales de entrada y salida del sistema

### 2.2.4 Canales de infiltración

Dos “caces” en tierra (1\*1,5m, talud 1/1) circulan paralelos de sur a norte por el 20% del viejo curso del arroyo de la Ermita con una longitud de unos 25 km y un desnivel de 30 metros. Sirven como sistema principal de recarga y distribución siguiendo la localización de las 8 cubetas menores del acuífero. El caz viejo circula por el Este durante 10,7 km y el caz nuevo por el Oeste está operativo desde 2005-06 y ocupa 9,78 km. Ambos cuentan con 5 interconexiones. El canal Este se extendió a partir de 2007-08 con 5,6 nuevos kilómetros más rodeando el núcleo de Villeguillo por el Este hasta el término de Llano de Olmedo.



### 2.2.5 Toma de derivación a Laguna de la Iglesia

Una tubería de unos 750 m parte desde el caz Oeste hasta un dispositivo “en hongo” que descarga el agua hacia la laguna alcalina remineralizándose a medida que circula sobre los biosedimentos y costras salina de la playa perilagunar.

### 2.2.6 Humedales Artificiales del Sanchón

Los humedales de Sanchón son excavaciones realizadas por TRAGSA aprovechando el alto nivel piezométrico por ese lado del acuífero para formar 3 balsas denominadas Sanchón 1, 2a y 2b. La primera es un ensanchamiento del canal de 1.374 m<sup>2</sup> fácilmente llenado por rebosamiento del canal. El segundo es una balsa cuadrangular de 2.418 m<sup>2</sup> con orla de freatófilas y el tercero es una extensa balsa rectangular de 15.740 m<sup>2</sup> cuya cota ligeramente superior a la continuación del canal Este hace más difícil su llenado.

### 2.2.7 EDAR de lagunaje

Se trata de una estación por lagunaje donde la capacidad de depuración es muy limitada según los datos de campo (**Figura 5**). Aporta anualmente 0,5 hm<sup>3</sup> a la recarga desde 2005. Ocupa 14.659 m<sup>2</sup> y da servicio al pueblo de Santiuste de San Juan Bautista. La EDAR, de los 17 compuestos considerados, aumenta de 200-400% el contenido en sulfatos, Ca, COD, Cl, alcalinidad, dureza y As, de 400-500% la conductividad, Mg y Na, de 500-700% turbidez y nitratos, en casi 2.000% K, P y fosfatos. La cafeína es un 5.600% y el amonio 14.211% mayor en el efluente. Sólo Fe y Cu son inferiores en el efluente de la depuradora (63 y 74%).

## 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las diferentes funciones de los dispositivos son dependientes de su puesta en funcionamiento (**Tabla 1**. Cronología de dispositivos operativos en Santiuste 2002-2012 (F. Escalante, 2014)). A modo de ejemplo, la recarga por el canal Este ha sido constante desde el inicio del proyecto mientras que la de la Laguna de la Iglesia ha sido intermitente entre 2005 y 2011 con sólo 4 campañas de funcionamiento.

**Tabla 1.** Cronología de dispositivos operativos en Santiuste 2002-2012 (F. Escalante, 2014)

DISPOSITIVOS	FUNCIONES PPALES.	2002/03	2003/04	2004/05	2005/06	2006/07	2007/08	2008/09	2009/10	2010/11	2011/12
Azud	Derivación	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Tubería	Transporte	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Balsa de infiltración	Infil. / Recr.			X	X	X	X	X	X	X	X
Canal de infiltración E (Caz Viejo)	Infil. / Trans.	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Canal Infiltración Nuevo (Ext. E)	Infiltración						X	X	X	X	X
Canal de infiltración O	Infiltración				X	X	X	X	X	X	X
EDAR	Depuración					X	X	X	X	X	X
Canal con biofiltro (tramo C. este)	Dep. / Tran. / Infil.					X	X	X	X	X	X
Humedales Artificiales 1 y 2	Dep. / Infil. / Amb.				X	X	X	X	X	X	X
Derivación a Laguna alcalina	Transporte				X	X			X	X	
Restauración Laguna alcalina	Ambiental				X	X			X	X	

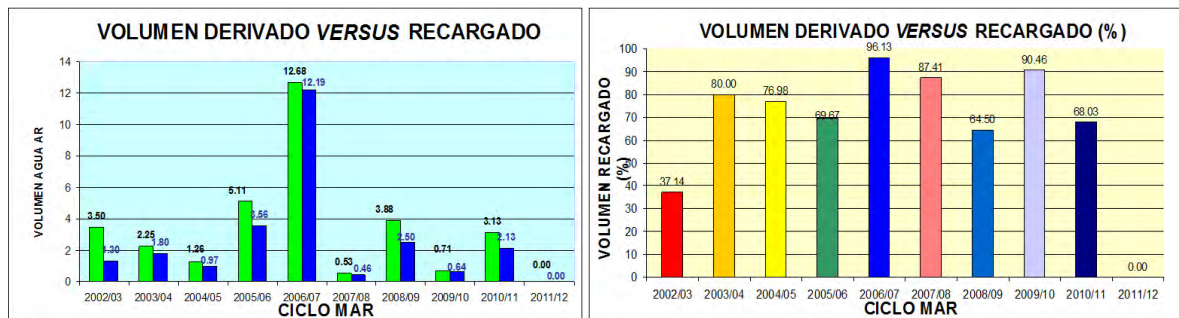
### 3.1 Usos del sistema de Recarga Gestionada de Acuíferos de Santiuste

#### 3.1.1 Recarga y distribución para riego (balsa, tuberías y canales)

El sistema pionero del acuífero de Santiuste abastece a unas 2.100 hectáreas de regadío, una superficie creciente por el efecto de garantía de dotación de la recarga. Los volúmenes anuales recargados entre 2002 y 2012 variaron entre 0,46 y 12,19 hm<sup>3</sup> (**Figura 4 a**). Desde 2005 se complementaron con otro medio hm<sup>3</sup> anual de la EDAR que opera durante todo el año. En la toma del río las derivaciones oscilaron entre 0,52 a 12,68 hm<sup>3</sup>. En 2012 la situación de sequía hizo imposible la recarga activa. La tasa de recarga en todo el sistema oscila entre 37,1 y 96,1% (**Figura 4 b**). Si originalmente se estimaban unas 850 ha regadas en la zona, hoy en día se ha consolidado este uso en 2.500 ha servidas por pozos.

Las balsas de decantación e infiltración están operativas desde 2004-05 y ocupan una superficie de 14.340 m<sup>2</sup> con una tasa de infiltración 3.000 mm/ha. En el vaso de la mayor de ellas se han realizado varias experiencias de labrado a distintas distancias de crestas entre surcos de labrado para facilitar la infiltración.

De los dos canales de infiltración se calcula que unos 22,7 km son de infiltración efectiva (tasa media de 2.500 mm/ha), mientras que unos 3 km no lo son según los ensayos realizados en la campaña 2004-05. De este modo, en esos tramos el transporte supera a la infiltración por lo que el sistema de 53 dispositivos de parada instalados y las 5 interconexiones permitirían fomentar diferencialmente el traslado frente a la infiltración de volúmenes a distintas sub-cubetas o sectores Norte o Sur en función de las necesidades de riego en cada una.



**Figura 4 a y b.** Gráficos de recarga en hm<sup>3</sup> y % de 2002 a 2012 (Determinación por 54 muestras y método WTF (F. Escalante, 2014))

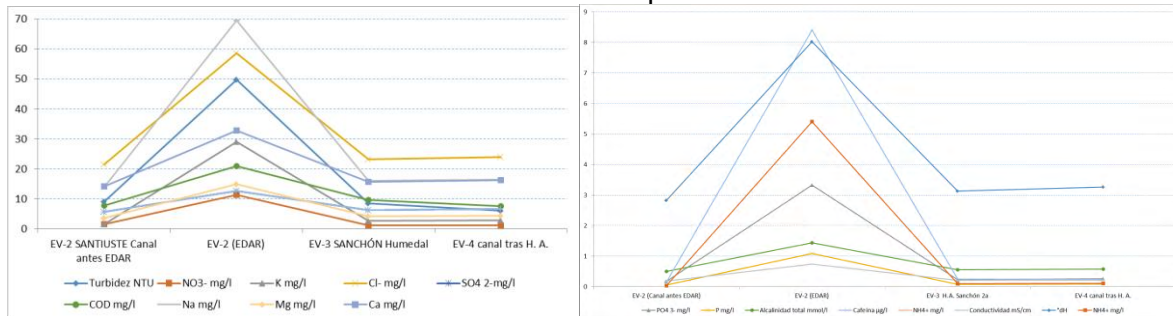
#### 3.1.2 Laminación de avenidas (aliviaderos del Sanchón y del Castrillo)

Los 2 aliviaderos sirven para evitar inundaciones en el entorno regable cuando los canales están repletos y suceden precipitaciones extremas al mismo tiempo. Sin embargo, el dispositivo podría aprovecharse también para la laminación de avenidas extraordinarias en casos de emergencia en el Voltoya mediante la derivación de caudales hasta 1000 m<sup>3</sup>/segundo por un circuito de 25 km de longitud.

#### 3.1.3 Depuración de aguas (biofiltro en canal)

La EDAR vierte el agua tratada en 4 balsas de lagunaje en el “caz” Este, que conserva su vegetación natural en este tramo, trabajando como un biofiltro, hasta llegar a un aliviadero, para casos de inundaciones o precipitaciones extremas que devuelve el excedente al Voltoya. El primer tramo es filtrante y ocupa 1.129 m mientras que el no filtrante se extiende durante 1.577 m hasta la desembocadura del Humedal 2b de retorno al Caz Viejo. El calado y el desarrollo vegetal juegan un papel crucial en los procesos depurativos del agua de mezcla de EDAR y agua del Voltoya.

Los principales parámetros de calidad del agua sufren una recuperación que se basa en la simple dilución tras el aporte de la EDAR al canal. Sin embargo, en la **Tabla 2** se pueden observar 7 parámetros de los analizados en **Figura 5** cuyos valores sufren una disminución significativa en el canal (Cu, Turbidez y Carbono Orgánico Disuelto) y los que la sufren en los Humedales Artificiales (Fe, P, Fosfatos y Amonio). Los parámetros con diferencias inferiores al 12% se han considerado poco demostrativos.



**Figura 5 a y b.** Gráficos de parámetros de calidad de agua en canal antes y después de la EDAR y de la propia EDAR (17/2/2015)

**Tabla 2.** Comparativa de parámetros con diferencias significativas a favor del canal (negativos) y a favor del humedal artificial (positivos) 17/2/2015

Estación	Cu mg/l	Turbidez NTU	COD mg/l	Fe mg/l	P mg/l	PO4 <sup>3-</sup> mg/l	NH4 <sup>+</sup> mg/l
EV-2 (Canal antes EDAR)	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
EDAR efluente	74%	546%	273%	63%	1902%	1910%	14211%
EV-3 H. A. Sanchón 2a	84%	94%	125%	92%	130%	130%	263%
EV-4 Canal tras H. A.	32%	66%	97%	104%	149%	149%	289%
Diferencia EV4-EV3	-53%	-28%	-27%	12%	19%	20%	26%

### 3.1.4 Depuración, filtración y restauración ambiental (Humedales Artificiales):

La presencia de un nivel freático superficial permitió la construcción de dos humedales artificiales tras el canal biofiltrante EN 2005-2006, cuya evolución biológica ayuda a finalizar el proceso de depuración del agua de la EDAR y su infiltración paulatina. Importante refugio faunístico en estío. La vegetación hidrofílica del canal y humedales está compuesta principalmente por *Phragmites australis* (carrizo) y *Scirpus holoschoenus* (junco), con otras especies, como *Juncus sp.* y *Typha domingensis* (enea). En humedales de baja salinidad se han instalado varias especies hidrofílicas, como la lenteja de agua (*Lemna sp.*) y del grupo de las algas verdes.

**Tabla 3.** Análisis de agua en Santiuste. Parámetros inestables in situ (Multiparameter HANNA HI 9829) 17/2/2015

Estación	pH	POR [mV]	OD [ppm]	CE [uS/cm]	STD [ppm]	Salinidad [PSU]	UNT	T <sup>a</sup> [°C]
EV-2 (Canal antes EDAR)	7	247	3,62	197	99	0,11	8,2	6,11
EDAR efluente	7	60	0,65	720	359	0,4	57,4	7,12
EV-2b	8	103,2	4,72	207	104	0,11	11,1	6,36
EV-3 H. A. Sanchón 2a	8	180	4,2	237	118	0,13	8,4	6,8

Los datos de la **Tabla 3** muestran como en el humedal (EV-3) respecto al canal previo (EV-2b) el Potencial Redox casi se dobla, pese al descenso del oxígeno disuelto, aumenta la CE y los sólidos disueltos pero baja la turbidez y aumenta la  $t^{\circ}$ . Los fenómenos de sedimentación y crecimiento bacteriológico o vegetal en la columna pueden justificar estos fenómenos pese contar aún solo con resultados preliminares.

En la **Tabla 2** se mostraban los parámetros que se reducen en los humedales artificiales (Fe, P, Fosfatos y Amonio) en relación con el comportamiento del canal, donde el caudal circulante y su morfología no facilitan la formación de un cierto calado y el estancamiento del agua que favorezcan la eliminación diferencial de estos compuestos.

### 3.1.5 Restauración ambiental (Laguna alcalina de la Iglesia):

La laguna de la Iglesia es un humedal alcalino rehabilitado por medio de una solución específica (F. Escalante, 2006). La recuperación de la mineralización, notoria en pH y CE, se logra mediante la interacción entre el flujo superficial del agua de recarga y los sedimentos salinos de la cuenca ribereña (**Tabla 4**), lo que permite la pervivencia de una colonia de bacterias endémicas (Sanz-Montero et al., 2013), vegetación protegida (Escudero et al., 2008) y un importante refugio de avifauna (**Tabla 5**).

**Tabla 4.** Análisis de agua en Santiuste. Parámetros inestables in situ (Multiparameter HANNA HI 9829) 22/1/2009 y 17/2/2015

Estación	pH	ORP [mV]	TOD [ppm]	CE [uS/cm]	STD [ppm]	Salinidad [PSU]	UNT	T <sup>a</sup> [°C]	P [mbar]
Tubería Salida 22/1/09	6,33	22,4	10,2	253	-	0,13	-	7,2	
Laguna de la Iglesia 22/1/09	-	-25,8	4,9	2.184	-	1,13	-	9,32	
Tubería Salida 17/2/15	7	121,7	14,5	244	123	0,14	8,2	5,88	935
Laguna de la Iglesia 17/2/15	9	115	5,77	5.397	2.703	3,37	570	8,01	937,7

En caso de humedales con procesos hidroquímicos alcalinizantes y reductores en sus aguas predominan procesos de desnitrificación y carbonatación, con el subsiguiente incremento de la alcalinidad, que favorece la descomposición de la materia orgánica y el desarrollo de organismos en el fango (Desir et al., 2003).

**Tabla 5.** Inventario de especies en la Laguna de la Iglesia (2007/2012//2015)

NOMBRE COMÚN	NOMBRE CIENTÍFICO	2007	13/5/2012	15/4/2015	NOMBRE COMÚN	NOMBRE CIENTÍFICO	2007	13/5/2012	15/4/2015
Aguilucho cenizo	<i>Circus pygargus</i>			X	Garza real	<i>Ardea cinerea</i>	X		
Ánade real	<i>Anas platyrhynchos</i>	X	X	X	Golondrina común	<i>Hirundo rustica</i>			X
Ánade friso	<i>Anas strepera</i>		X	X	L. cascadeña	<i>Motacilla cinerea</i>			X
Ánade rabudo	<i>Anas acuta</i>	X			Milano negro	<i>Milvus migrans</i>		X	X
Ánade silbón	<i>Anas penelope</i>	X			Pato colorado	<i>Netta rufina</i>	X		
Andarriós chico	<i>Actitis hypoleucos</i>		X		Pato cuchara	<i>Anas clypeata</i>	X	X	X
Avefría	<i>Vanellus vanellus</i>	X		X	Polla de agua	<i>Gallinula chloropus</i>	X		
Avoceta	<i>Recurvirostra avosetta</i>		X		Tarro blanco	<i>Tadorna tadorna</i>	X		X
Cerceta	<i>Anas querquedula</i>			X	Tórtola común	<i>Streptopelia turtur</i>		X	

carretona								
Cerceta común	<i>Anas creca</i>	X			Triguero	<i>Miliaria calandra</i>		X X
Chorlito	<i>Charadrius spp.</i>		X		Zampullín chico	<i>Tachybaptus ruficollis</i>	X	X
Cigüeñuela	<i>Himantopus himantopus</i>	X	X	X	Zampullín cuellinegro	<i>Podiceps nigricollis</i>		X
Focha común	<i>Fulica atra</i>	X		X				

La primera franja perilagunar corresponde con el transepto de especies subhalófitas y alcalinófitas, asociadas a zonas de descarga de sistemas de flujos intermedios (Rey Benayas, 1991). Según este autor, las especies inventariadas e indicadoras de esta franja del perfil son las siguientes (sic): *Alopecurus geniculatus*, *Deschampsia cespitosa subsp. refracta*, *Rumex conglomerata*, *Festuca arundinacea subsp. fenas*, *Juncus acutus*, *Juncus gerarsi*, *Scirpus maritimus subsp. compactus*

La siguiente franja perilagunar en los humedales salinos está ocupada por especies halófitas asociadas a aguas subterráneas muy mineralizadas y envejecidas, como son: *Aerulopus littoralis*, *Artemisia caerulescens*, *Convolvulus lineatus*, *Frankenia lavéis*, *Juncus maritimus*, *Juncus subulanus*, *Limonium costae* y *Suaeda vera*.

La zona periférica de protección u orla perilagunar de carácter salino de los suelos con ocasional erosión del horizonte A se conoce como salguero, y presenta eflorescencias bien en un cinturón o bien desconectadas en manchas blancas y grises de sales en el sustrato. En conjunto constituyen los "prados salinos." En ocasiones hay especies adaptadas a la salinidad, como los tarays (*Tamarix canariensis*) y otras especies más comunes en lugares salinos, como *Suaeda splendens*, *Salicornia europea*, *Chenopodium cf. quenopodialis* y *Kickxia cf. spuria*.

#### 4 CONCLUSIONES Y EXPECTATIVAS

Los dispositivos implementados cumplen simultáneamente diversos papeles:

- Recarga subterránea de fuente superficial en temporada de aguas altas. 10 años de recarga contrastada por datos de derivación, tasa de recarga, longitud de canal filtrante, superficies de infiltración, inversión, días de funcionamiento...
- Distribución de recursos por una zona regable alimentada por pozos. Las tuberías, los canales interconectados y la infiltrabilidad diferencial permiten trasladar caudales de sur a norte sin coste energético por 15 km de zona regable.
- Ahorro en bombeo por subida de piezometría. Según los datos proporcionados por la CR de Santiuste, para bombeo medio para riego de 9950 m<sup>3</sup>/pozo, y a 0,106986 €/kWh; el ahorro anual en consumo directo de energía por pozo se estima en 27,1 kWh/m lo que equivale a 2,90 €/m. Es decir, por cada metro de nivel freático ganado, se ahorran 27,1 kWh (2,90 € a la tarifa dada).
- Mejora de calidad del agua: Disminución de NO<sub>3</sub> (29%), Cu (68%) y turbidez (34%) en canal (EV-4) respecto al agua de entrada del Voltoya (EV-2).
- Biodepuración pasiva por dilución, sedimentación y bioactividad por todos los parámetros de canal (EV-4) respecto a EDAR y por los datos de Fe, P, Fosfatos y Amonio en humedales (EV-3) respecto al propio canal
- Gestión de vertidos. El sistema de recarga absorbe el efluente de la EDAR (incluso fuera de campaña) haciéndolo circular por los biofiltros de canales y humedales.



- Laminación de avenidas: Aliviaderos de Sanchón y Castrillejo hacia los ríos Voltoya y Eresma respectivamente con capacidad extra en el humedal Sanchón 2b.
- Fomento de biodiversidad: Uso contrastado de hasta 25 especies de aves en la laguna de la Iglesia y en menor medida de los humedales artificiales y canales.
- Protección de endemismos: Especies de alto valor de la Laguna de la Iglesia con la Comunidad Arctodiaptomion con *Arctodiaptomus salinus* y *Cletocamptus retrogressus* (Crustacea), además de *Cyanobacterias*, *diatomeas*, *ostrácodos* (Crustacea)...
- Creación de elementos socio-culturales: Las láminas de agua de balsas, lagunas y humedales han generado en su entorno áreas de interés paisajístico y recreativo.

Sobre todos las demás funciones, la recarga cuenta con el importante incentivo del apoyo y cooperación de la sociedad rural que se beneficia del sistema como lo demuestra la colaboración en la gestión mantenimiento y participación de ayuntamientos y regantes en las labores de recarga, tareas relacionadas con el seguimiento e I+D+i y sesiones de difusión del conocimiento entre los usuarios y habitantes.

Estos datos son el punto de partida para la generación de indicadores que sirvan para valorar el funcionamiento de los sistemas de recarga y la comparación entre dispositivos bajo condiciones técnicas y funcionales equivalentes dentro del marco del proyecto europeo MARSOL (Schüth et al., 2014).

## 5 AGRADECIMIENTOS

Este artículo ha sido redactado por miembros del equipo del Grupo Tragsa del proyecto europeo MARSOL (Demonstrating Managed Aquifer Recharge as a solution to water scarcity and drought) (WP5), con el apoyo de la European Commission, convocatoria Water Inno-demo (FP 7) con Grant Agreement: GA 619120. El artículo refleja el punto de vista de los autores y la Comisión no tiene responsabilidad sobre las opiniones publicadas en el mismo.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

Desir, G., Gtez. Elorza, M. & Gtez. Santolalla, F. (2003). Origen y evolución de las playas en una zona semiárida con arenas eólicas (región de Coca, Cuenca del Duero, España). Boletín Geológico y Minero 114(4), pp. 395-407.

Escudero, A. et al. (2008). Guía básica para la interpretación de los hábitats de interés comunitario en Castilla y León. Junta de Castilla y León. Consejería de Medio Ambiente. Valladolid. 432 pp.

Fdez. Escalante, E. (2006). Los humedales. Detección de impactos ambientales y posibilidades de regeneración hídrica mediante la gestión de la recarga artificial. El ejemplo de la laguna de la Iglesia, Villagonzalo de Coca (Segovia). Tecnológí@ y Desarrollo. Revista de ciencia, tecnología y medio ambiente. Volumen IV. Separata.

Fdez. Escalante, E. (2014). 2002-2012, Una década de recarga gestionada. Acuífero de la Cubeta de Santiuste (Castilla y León). Libro, Serie hidrogeología Hoy título 7, Ed. Tragsa, Madrid ISBN: 84-616-8910-0, 298 pp.





Galán López, R., Fdez. Escalante, E. & Mtez. Rubio, J. (2001). Contribuciones al estudio hidrogeológico para la recarga artificial del acuífero de la Cubeta de Santiuste. (Segovia). VII Simposio de hidrogeología, AEH, Murcia.

Rey Benayas, J. M. (1991) Aguas subterráneas y ecología. Ecosistemas de descarga de acuíferos en los arenales. Colección Técnica 139, ICONA, Madrid 141 pp.

Sanz Montero, M. E. et al. (2013). Procesos de sedimentación y biomineralización en la laguna alcalina de las Eras (Humedal Coca-Olmedo). Geogaceta 53. ISSN 0213-683X.

Schüth, C. et al. (2014) MARSOL Demonstrating Managed Aquifer Recharge as a Solution to Water Scarcity and Drought. EGU General Assembly 2014, Geophysical Research Abstracts, Vol. 16, EGU2014-9073.



## DESARROLLO, IMPLEMENTACIÓN Y BENEFICIOS DEL SISTEMA DE ASESORAMIENTO AL REGANTE - SAI EN BRASIL

*Silva do Nascimento, A. K.<sup>1</sup>, Tarjuelo Martín-Benito, J. M.<sup>2</sup>, Ribeiro Vieira Lima, S. C.<sup>3</sup>,  
Martinez-Romero, A.<sup>4</sup>, Frizzone, J. A.<sup>5</sup>*

<sup>1</sup> Tecnóloga en riego, Estudiante de Doctorado, Centro Regional de Estudios del Agua (CREA), UCLM, Ctra. de Las Peñas km. 3.2, 02071 Albacete, España; [anakelliane@gmail.com](mailto:anakelliane@gmail.com)

<sup>2</sup> Dr. Ingeniero Agrónomo, Catedrático de Universidad; Departamento de Producción Vegetal y Tecnología Agraria, Universidad de Castilla-la Mancha, UCLM, España; [jose.tarjuelo@uclm.es](mailto:jose.tarjuelo@uclm.es)

<sup>3</sup> Investigador, Instituto de Pesquisa e Inovação na Agricultura Irrigada (INOVAGRI), Brasil [silviocarlos@inovagri.org.br](mailto:silviocarlos@inovagri.org.br)

<sup>4</sup> Dr. Ingeniero Agrónomo, Profesor Asociado; EIIAB, Departamento de Mecánica Aplicada e Ingeniería de Proyectos, UCLM, España; [angel.mromero@uclm.es](mailto:angel.mromero@uclm.es)

<sup>5</sup> Dr. Ingeniero Agrónomo, Profesor Titular, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz-ESALQ/ USP, Brasil [frizzone@usp.br](mailto:frizzone@usp.br)

### Resumen

Un Servicio de Asesoramiento al regante (SAR) tiene como objetivo principal la optimización del uso del agua en la agricultura, dando respuesta a las demandas tecnológicas de los regantes. El objetivo del trabajo es evaluar la implantación y los beneficios de un modelo de SAR en Brasil, planteado para ofrecer una programación individualizada de riego en parcela a cada uno de los usuarios, basado en el uso de la herramienta on-line "Web S@I". La herramienta incluye en su base de datos una parte fija con información relativa a cada parcela (características del suelo, cultivo, caracterización del sistema de riego, etc ) y otra dinámica que incorpora, tanto la información obtenida de las estaciones agrometeorológicas en la zona que permite calcular la Evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) diaria utilizando el método de Penman-Monteith, como los valores de los coeficientes de cultivo (K<sub>c</sub>), obtenidos en base al seguimiento en campo de Iso técnicos. Las encuestas indican que el 31% de los agricultores siguen la información que se les facilita y que la productividad del agua (WP) aumenta en los usuarios del sistema S@I mejorando la gestión del agua en el Distrito de riego DIBAU.

### 1. Introducción

La eficiencia técnica de riego, que es la forma de hacer las mismas cosas, pero usando poca agua, es el preferido por los tomadores de decisiones, sobre el problema de la escasez de agua. Para evaluar el efecto de la eficiencia técnica en una sociedad dada, requiere un debate sobre la productividad del agua, que se puede expresar como agua de uso agrícola por unidad de volumen (Playan; Mateos, 2006).

Playán y Mateos (2006) encontraron que, en grandes y antiguos distritos de riego en España, se alentó a las técnicas de gestión para reducir el consumo excesivo de agua de determinados cultivos; Como resultado, se lograron ahorros considerables en agua, con casi los mismos rendimientos de los cultivos. Esto sólo con la orientación y la reeducación de los agricultores.

Un Servicio de Asesoramiento al regante (SAR) tiene como objetivo principal la optimización del uso del agua en la agricultura, dando respuesta a las demandas

tecnológicas de los regantes en aspectos tales como la estimación de las necesidades de agua de los cultivos, la programación de riego, evaluar y analizar el funcionamiento de los sistemas de riego o planificar la formación de los regantes, tomando decisiones integradas con el agricultor.

A pesar de los esfuerzos significativos en muchas regiones del mundo, suele haber muchas limitaciones para la implementación de un Servicio de Asesoramiento de riego - SAI, así como para su desarrollo presente y futuro. Estas limitaciones son de naturaleza muy diferente: política, económica y técnica. Algunas de ellas aparecen en el inicio del servicio y otros surgen en su propio desarrollo, lo que puede limitar su eficacia (Mateos, 2008).

Las primeras experiencias con servicios de asesoramiento al regante fueron realizadas en Estados Unidos (Eching 2002; English 2002), donde el CIMIS (California Irrigation Management Information System) puede tomarse como un referente que expone el potencial de los SAIs. Aproximadamente 98% de la superficie regada en España se localiza en las Comunidades Autónomas que cuentan con SARs (3.526.197 ha). España, cuenta con una red de aproximadamente 500 estaciones agroclimáticas completas dentro de la red SIAR que son utilizadas por los 9 principales SARs. De entre ellos, el de Castilla-La Mancha, en funcionamiento desde el año 1999, ha colaborado directamente con más de 2000 agricultores, asesorando anualmente alrededor de 120000 ha de regadío.

El Instituto INOVAGRI y el Instituto Nacional de Ciencia y Tecnología en Ingeniería de Riego (INCT-EI), con sede en ESALQ/USP, creado en 2011, planteó un proyecto con el objetivo de desarrollar un modelo de Servicio de Asesoramiento para el riego-SAI. El área piloto que sirvió como la observación y la experimentación fué el Distrito de Riego de Bajo Acaraú (DIBAU) en el estado de Ceará, Brasil.

El objetivo del trabajo es evaluar la implantación del Sistema de Asesoramiento al Regante (SAR) en Brasil, creado para planificar la programación de riego en parcela de cada uno de los usuarios, basado en el uso de la Web S@I como herramienta fundamental para la gestión del riego.

## 2. Materiales y métodos

El proyecto fue implementado en el Distrito de Riego Bajo Acaraú, con sede ubicada en el Triángulo de Marco, a 220 km de Fortaleza, en el norte del estado de Ceará. El clima es, de acuerdo con la clasificación de Thornthwaite y Mather (1955), Aw tropical lluvioso, lo que representa el clima cálido, con una precipitación media anual de 900 mm, concentradas en los meses de enero a junio. Las temperaturas: mínimo, medio y máximo anual son 22.8, 28.1 y 34.7 °C respectivamente. La insolación de 2.650 h<sup>-1</sup> año, la humedad relativa anual de 70%, la velocidad del viento media de 3 m s<sup>-1</sup> y la evaporación promedio anual de 1.600 mm.

Para ejecutar el proyecto, era necesario conocer la situación actual del riego en la zona. Para esto se aplicó un formulario de catastro con el fin de conocer información sobre el productor y en su propiedad, el sistema de riego, detallando el equipo utilizado desde la bomba hasta el emisor, así como información sobre la gestión del riego, tipo de suelo, la plantación, las especies, variedades, etapa de crecimiento, la nutrición y la salud de los cultivos. Después de la preparación del formulario de registro comenzó la aplicación del cuestionario individual en todos los lotes.

### 2.1. Evaluación de los Sistemas

Después de conocer las características del perímetro de riego, se seleccionaron los agricultores que aceptaron participar del proyecto, fijándose 44 parcelas para realizar evaluaciones de Uniformidad de Emisión de Agua (UE) y la comprobación de posibles

problemas durante la instalación y/o funcionamiento del sistema. Para determinar la UE, es necesario medir el caudal de los emisores a lo largo de las líneas laterales, y la presión de trabajo al comienzo de las líneas de derivación o unidad de trabajo. La UE se determinó mediante la ecuación 1, siguiendo la metodología de Keller & Karmeli (1975), seleccionando 4 grupos de emisores en 4 laterales diferentes hasta conseguir los 16 grupos de emisores de control.

$$UE = 100 \frac{q_{25}}{q} \quad (1)$$

Donde;

UE – uniformidad de Emisión (%),  
 $q_{25}$  - media de los 25% de los valores más bajos,  
q - promedia de los valores.

## 2.2. Sistema S@I

En 2011 comenzó el desarrollo de software de gestión de riego. Un equipo formado por un analista de sistemas, un programador y un "diseñador de páginas web", junto con agrónomos y técnicos de riego del SAI, construyeron el nuevo software titulado Sistema de Asesoramiento al Regante - S@I. La base de datos se alimenta con: a) la información obtenida de una estación meteorológica automatizada del Instituto Nacional de Meteorología (INMET) que está instalada en el Distrito de Riego Bajo Acaraú (DIBAU) para calcular la ETo diaria utilizando el Penman-Monteith (Allen et al., 1998); b) los valores de los coeficientes de cultivo ( $K_c$ ), obtenidos de investigaciones y estudios locales en la región norte, y en ausencia de ellos, se utilizan los datos de FAO (Allen et al., 1998); y c) las entrevistas a los regantes para conocer los datos de suelo, cultivo, caudal de emisores, etc. antes comentados.

A partir de esta información se genera, para cada agricultor, una recomendación de tiempo de riego (TI) según las características de su sistema de riego, con el fin de aportar la dosis de riego pretendida de acuerdo con el balance simplificado de agua en el suelo (Lira et al., 2011; Lima et al., 2012), y envía un SMS o correo electrónico al agricultor.

En 2012, tras realizar un conjunto de pruebas preliminares del sistema, se inició el envío de mensajes a los agricultores con la información antes comentada, y después de dos meses de funcionamiento del servicio se celebró una entrevista con 60 regantes seleccionados para evaluar el recibo, la receptividad y la adopción de la mensajes. El cuestionario tenía el siguiente contenido.

QUESTIONÁRIO SAI MENSAGENS

Irrigante: \_\_\_\_\_

Lote: \_\_\_\_\_ Data: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_

1 - Está recebendo as mensagens de irrigação do SAI?  
 SIM ( ) Não ( ) Telefone: \_\_\_\_\_

2 - Está compreendendo as mensagens da irrigação?  
 SIM ( ) Não ( ) Dúvida: \_\_\_\_\_

3 - Os setores estão compatíveis com o que estão em campo?  
 S1 \_\_\_\_\_ S2 \_\_\_\_\_  
 S3 \_\_\_\_\_ S4 \_\_\_\_\_  
 S5 \_\_\_\_\_ S6 \_\_\_\_\_  
 S7 \_\_\_\_\_ S8 \_\_\_\_\_

4 - Está seguindo a recomendação de irrigação fornecida pelo o SAI?  
 Se SIM, desde quanto? \_\_\_\_\_  
 Se Não, por quê? \_\_\_\_\_

5 - Quanto tempo de irrigação coloca em cada setor ou parcela?

**Figura 1.** El modelo de formulario de registro aplicada a los regantes.

En 2013 un nuevo formulario fue distribuido en lo Perímetro de regadío para los usuarios del sistema, con el fin de conocer la aceptación del Proyecto SAI. Las preguntas dirigidas fueron las siguientes: a) ¿Está recibiendo, comprende y sigue la información de riego proporcionada por el SAI?; b) ¿Qué beneficios fueron identificados con el Proyecto SAI?; c) ¿Quieres recibir o continuar recibiendo la información a través de SMS o correo electrónico?

También se ha evaluado, en tres períodos, los indicadores económicos ligados al SAI con el objetivo de analizar los beneficios del sistema. Para esta evaluación, se definió el indicador económico de la productividad del agua, con los datos de volumen de agua distribuida en el Distrito de riego DIBAU y los datos proporcionados por el sistema S@I como recomendaciones de riego para el Distrito, como se muestra en las ecuaciones 2 y 3.

Para la evaluación de productividad de agua realmente utilizada por DIBAU se definió la ecuación (2).

$$WP_{DIBAU} (\text{€ m}^{-3}) = \frac{\text{Valor anual de la producción agrícola}}{\text{Volume anual de riego derivado al Distrito}} \quad (2)$$

En la evaluación de la productividad del agua indicada por S@I, si el distrito usaría en ese momento, se definió la ecuación (3).

$$WP_{S@I} (\text{€ m}^{-3}) = \frac{\text{Valor anual de la producción agrícola}}{\text{La evapotranspiración del cultivo calculado por S@I}} \quad (3)$$

### 3.0. Resultados y discusión

Este distrito cuenta con 8.335 hectáreas, divididas en 522 parcelas, con los agricultores organizados en una comunidad de regantes. Las parcelas son pequeñas (8 ha), medianas (16 a 18 ha) y grandes (80 a 200 ha), con cultivos frutales y hortalizas, destinadas al mercado interno y la exportación. Los datos recogidos muestran que la superficie total se

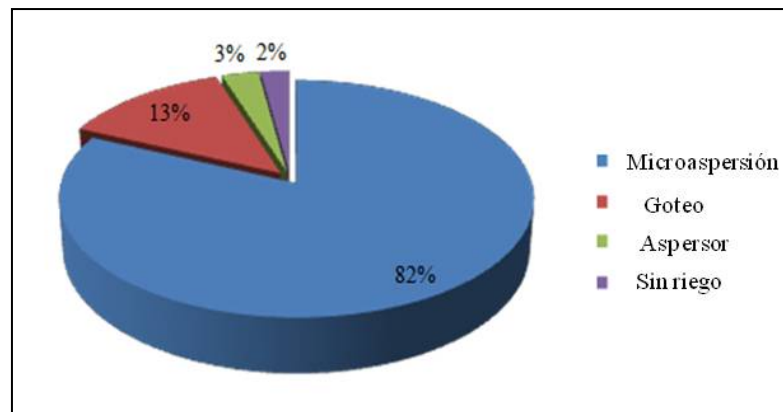
divide entre los colonos, técnicos y empresarios en un total de 337 productores que se distribuyen como se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Régimen de ocupación de DIBAU

Discriminación	Regantes	Área (ha)
Colonos	310	2480
Técnicos	13	235
Empresarios	14	1127
Reserva legal	1	1556
Total	337*	3842*

De este total, 107 productores han optado por abstenerse de participar en la investigación. Varios, por falta de una mejor explicación, porque creían que esto serviría para recaudar más tasas o impuestos en lugar de un beneficio para la comunidad. Por lo tanto, 230 regantes activos participaron del cuestionario. Al final de la evaluación de los datos obtenidos, se encontró que de los 556 productores registrado, 60,6% están activos y 39,4% no son activos (bosque virgen o inactivo). El 60,6%, productores activos (lo que supone 337 productores) tienen 3.842 hectáreas de superficie total, pero sólo el 65%, lo que equivale a 2.497 ha, son de regadío.

El agua del río Acarau se bombea para luego ser repartida por gravedad a través de los canales. El sistema de riego predominante es el tipo localizado (goteo y microaspersión), sin embargo, hay un 3% de la superficie con riego por aspersión (Figura 2).



**Figura 2.** Distribución de sistemas de riego en el Perímetro de Regadío Bajo Acaraú.

En el perímetro de riego, sólo el 4,8% de las zonas de regadío tenía un método de gestión del agua relativamente bien definido. En el resto de casos el regante sólo utiliza la intuición visual para definir si riega o no. El predominio del suelo es arenoso a franco arenoso y la principal actividad es el cultivo de frutas, sobre todo que la plantaciones de coco, plátano, guayaba y papaya.

### 3.1. Evaluación de los sistemas de riego

Tras la finalización de las evaluaciones de los productores seleccionados, se puede observar en la siguiente tabla los resultados.

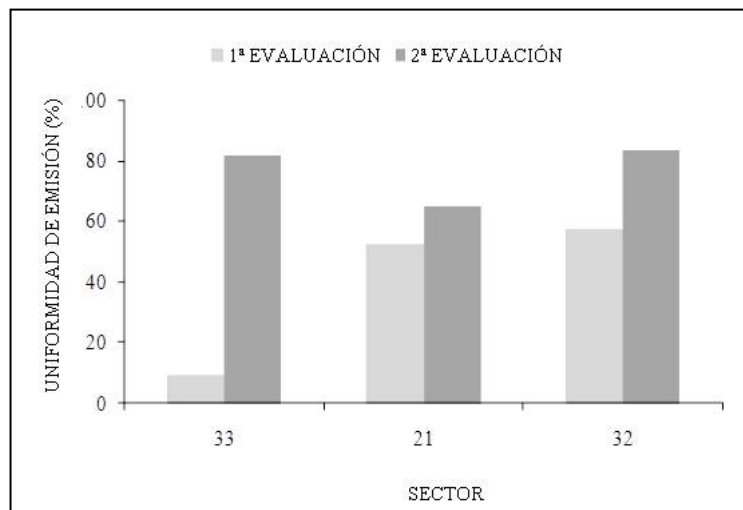


**Tabla 2.** Clasificación de los sectores conforme UE sugerida por Bralts (1986).

Clasificación	UE (%)	Nº de Sectores
Excelente	90-95	11
Bien	80-89	13
Aceptable	70-79	11
Malo	< 70	9

Los resultados en 11 sectores clasificados como aceptable se deben a un largo tiempo de uso con prácticas de gestión no muy adecuadas. En el caso de los 9 sectores clasificados como Malo, los problemas encontrados fueron fundamentalmente: la ausencia de filtros, el gran número de fugas, la ausencia de emisores y la falta de conocimiento operativo.

A los 9 sectores clasificados como malo, los técnicos de lo SAI hicieron algunas sugerencias como: 1) quitar obstrucción de los emisores con la apertura de los finales de línea; 2) limpieza del sistema de filtración; 3) la sustitución de los emisores con diferente caudal que los demás. De ellos, sólo 3 siguieron las recomendaciones y se llevó a cabo una nueva evaluación, resultando en una mejora en los valores de la UE, respectivamente, de 9 %; a 81%, de 52% a 65% y 57% a 84%; en el segundo sistema de evaluación, como se muestra en la Figura 3. Sólo las áreas 33 y 32, cambió su clasificación de Malo a Bien, siguiendo los criterios de Bralts (1986).

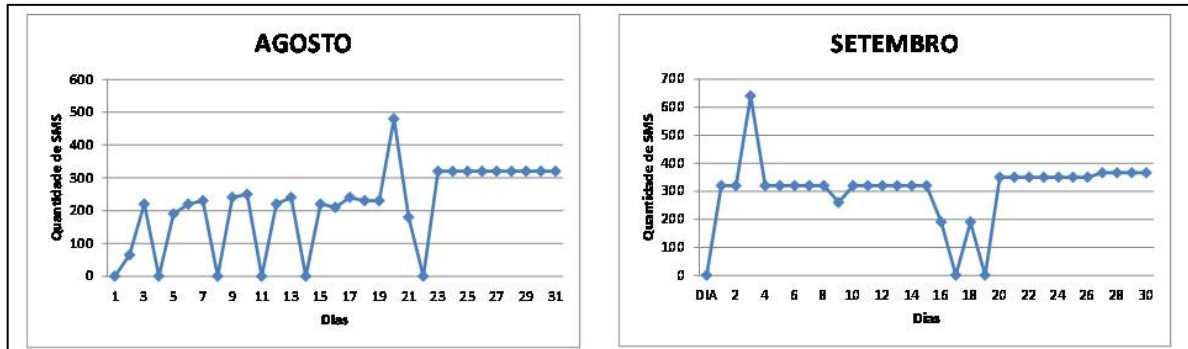


**Figura 3.** Uniformidad de agua en sectores reevaluado.

A los efectos de una gestión del riego correcto, la evaluación de la uniformidad es uno de los puntos básicos más importantes, y tiene como objetivo mejorar la productividad y/o la rentabilidad de la propiedad. En situaciones en las que el agua está limitada, tal como ocurre en muchas regiones del Brasil, el manejo eficiente tiene implicaciones importantes, ya que la falta de uniformidad del riego implica el exceso de agua en una parte del campo y su falta a otro, lo que lleva la necesidad de aumentar la profundidad del agua con el fin de lograr el mejor rendimiento (Mantovani et al., 2007).

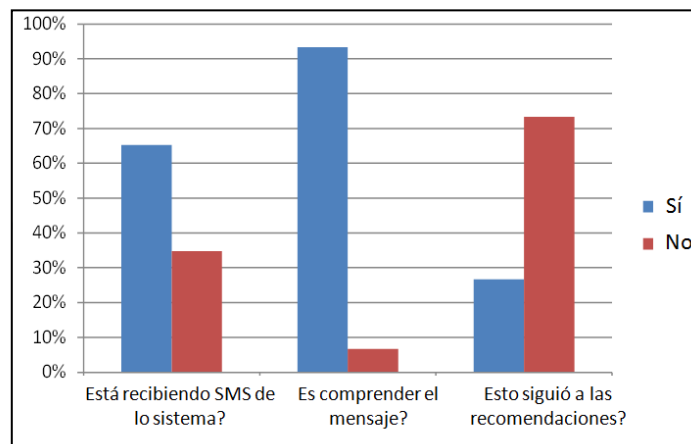
### 3.2. Envío de mensajes

El 1 de agosto de 2012, se comenzó a enviar mensajes a través de SMS y el servicio web a los regantes. Los mensajes enviados contenían la información de Tiempo de Riego (TI). El número de mensajes se puede ver en la Figura 4.



**Figura 4.** Los mensajes de texto enviados a los regantes de DIBAU en agosto y septiembre de 2012

En la Figura 5 se puede ver la receptividad de la información por los regantes al envío de mensajes por lo SAI.



**Figura 5.** La receptividad por los regantes, de los SMS enviados por el SAI

Los resultados muestran que 65,22% estaban recibiendo y de éstos, 93,33% comprende el mensaje. La principal razón para no recibir, estaba en un error en el registro, pues por lo general el teléfono informado en registro no era el real. Entre las dudas más importantes de los regante está el no entender la nomenclatura, y algunos no entendían el propio sistema de envío de los mensajes.

Como consecuencia de ello, sólo el 27% utilizaron la información. Las principales razones para no seguir las recomendaciones fueron: a) no tener conocimiento de cómo adaptar el programador de riego; b) el regante creen que la recomendación está sobreestimando el requerimiento de agua del cultivo y c) existe incompatibilidad del tiempo total de riego con la disponibilidad de tiempo de riego al día.

En la investigación realizada en 2013, Sousa et al. (2013) encontraron que el número de regantes que recibieron la información suministrada por el SAR es de alrededor de 97% y algunos aspectos contribuyeron al logro de este número significativo, como la mejora de estructura de los informes, al hacerlos fáciles de entender y recibir la información a través de e-mail. Sin embargo, sólo el 36% siguió las recomendaciones del SAR.

En la Tabla 3, dentro del conjunto de riegos presentado por Sousa et al. (2013), el resultado de la entrevista de este estudio mostraron que en comparación con los regantes que usan los tiempos de riego recibidos, aproximadamente el 31% lo siguen totalmente y el 41% solo en parte.

**Tabla 3.** Forma de uso de los SMS recibidas

<b>FORMA DE USO DE LO TIEMPO DE RIEGO RECIBIDAS</b>	<b>%</b>
Siguen solo en parte	41,02
Siguen totalmente	30,77
Siguen siempre que sea posible	28,21

Entre los beneficios citados por los regantes que siguen las recomendaciones de los tiempos de riego enviados por el Proyecto SAI, se observó una mejora visual del 26% de los cultivos de regadío (Tabla 4).

**Tabla 4.** Beneficios de los Cultivos

<b>BENEFICIOS IDENTIFICADOS EN CULTURA</b>	<b>%</b>
Mejora en el aspecto visual	25,64
No se nota ninguna alteración	74,36

La encuesta también encontró que los regantes quieren recibir la información, pero aproximadamente el 20% de los regantes están optando por recibir la información de tiempo de riego a través de correo electrónico. El muestreo mostró resultados similares a los reportados por Car et al. (2012). El autor al final de la temporada, realizó una entrevista con los usuarios y encontró que el 80% de los regantes desea utilizar el mensaje, pero no completamente, sino solo como un apoyo a la toma de decisiones, ya que otras características deben ser tomadas en cuenta, especialmente la apariencia visual de las plantas.

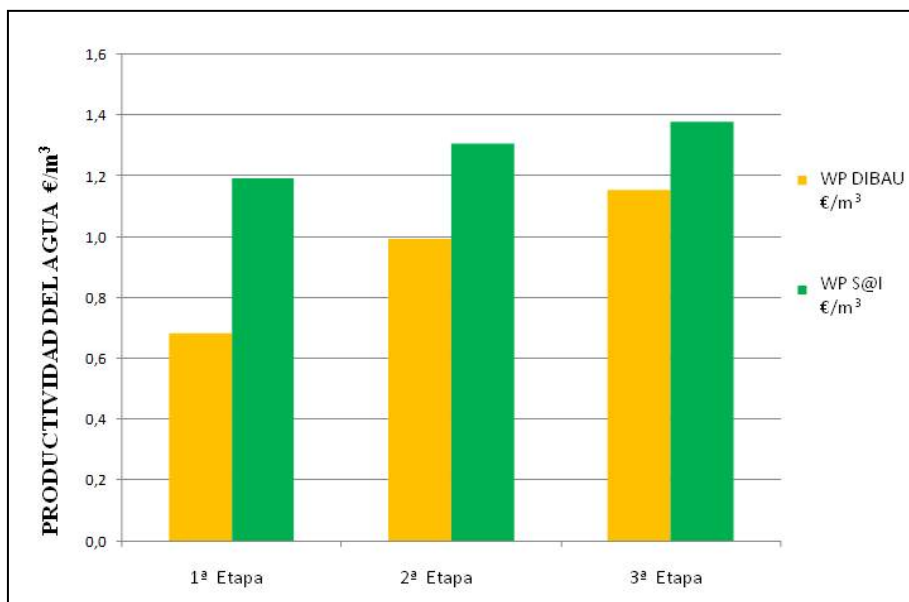
En la evaluación de la productividad, se analizaron los datos del agua repartida en Distrito de DIBAU (WP DIBAU) y los datos calculados por el sistema SAI (WP S@I). Para un análisis más detallado del proyecto se dividió en tres fases:

En la primera fase (julio-agosto/2012), se observó que en el Distrito (DIBAU) el consumo de agua, de manera efectiva para riego, fue 22.620.408 m<sup>3</sup>, como registro total en los medidores de agua instalados en la zona de muchos agricultores. Este valor fue superior a la recomendada por el sistema S@I, que proporcionó una demanda de agua de los cultivos de 13.404.788 m<sup>3</sup> (59,26% del total de agua medido como repartida). Si los agricultores hubieran utilizado la recomendación de S@I, el distrito tendría un ahorro de 9.215.620 m<sup>3</sup> de agua.

En la segunda fase (agosto/2012-Jul/2013), el consumo del Distrito fue mayor (43.220.476 m<sup>3</sup>) que la recomendación del sistema S@I (31.762.753 m<sup>3</sup>). Esta superioridad fue equivalente a 73.5% del volumen total recomendado por el programa. Si los regantes hubieran seguido la recomendación del S@I, el Distrito habría logrado un ahorro de 11.457.724 m<sup>3</sup> de agua durante este período.

La aplicación de agua en la tercera etapa de este análisis fue 45.513.148 m<sup>3</sup>, lo que demostró una vez más que está por encima del valor recomendado por S@I como necesidad de agua de los cultivos (38.157.401 m<sup>3</sup>), equivalentes al 83,8% de agua aplicada, representando un ahorro de 7.355.748 m<sup>3</sup> de agua.

En la Figura 6 se puede ver la productividad del agua (WP) de DIBAU varió de 2,21€·m<sup>-3</sup> a 3,74€·m<sup>-3</sup> y WP del S@I varía desde 3,87 €·m<sup>-3</sup> a 4,49 €·m<sup>-3</sup>. En todas las situaciones, la WP S@I fue más alta que la WP DIBAU (Lima et al., 2015).



**Figura 6.** Resultados de la Productividad del Agua en DIBAU obtenidos por S@I

#### 4.0. Conclusiones y recomendaciones

El sistema envía la información correcta y debe ser utilizada como una herramienta de gestión para el riego en las zonas de regadío;

El reto es mejorar aún más la comunicación con los agricultores para una transferencia de la información riego más eficiente y mejorar en la aceptación y seguimiento de las recomendaciones;

Con la evaluación de la productividad del agua (WP), el sistema S@I muestra que es eficiente a nivel general y demostró el posible beneficio que este sistema puede proporcionar la gestión del agua en el Distrito DIBAU.

#### 5.0. Agradecimientos

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES.

#### 6.0. Bibliografía

Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M., Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage. Paper 56. FAO, Rome, Italy, 1998

Bralts VF. Field performance and evaluation. In: Nakayama FS, Bucks DA, (Ed.) Trickle irrigation for crop production. Amsterdam: Elsevier, 1986. p.216-240. (Development in Agricultural Engineering, 9).

CAR N. J., CHRISTEN E. W., HORNBuckle J. W., MOORE G. A. Using a mobile phone Short Messaging Service (SMS) for irrigation scheduling in Australia – Farmers' participation and utility evaluation, Computers and Electronics in Agriculture, 84, 132143, 2012



ECHING S. Role of technology in irrigation advisory services: The CIMIS experience. 18th Congress and 53rd IEC meeting of the International Commission on Irrigation and Drainage (ICID). FAO/ICID International workshop on Irrigation Advisory Services and Participatory Extension Management. 24 July 2002. Montreal, Canada

ENGLISH M. Irrigation advisory services for optimum use of limited water. 18th Congress and 53rd IEC meeting of the International Commission on Irrigation and Drainage (ICID). FAO/ICID International workshop on Irrigation Advisory Services and Participatory Extension Management. 24 July 2002. Montreal, Canada

Keller J, Karmeli D. Trickle irrigation design. Glendora: Rain Bird Sprinkler. 1975.133 p.

LIMA, S. C. R. V. ; SOUZA, F. ; FRIZZONE, J. A. ; CAMARGO, D. C. ; BELTRAO JUNIOR, J. A. ; NASCIMENTO, A. K. S. . Desempenho do sistema de assessoramento ao irrigante - S@I para a gestão da água em áreas irrigadas: benefícios aos irrigantes e ao distrito. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada, v. 9, p. 1-13, 2015.

LIRA, J. V.; MOURÃO JÚNIOR, F.; SOUSA, A. E. C.; LIMA, S. C. R. V. ; FRIZZONE, J. A; VIANA, J. M. Auditoria de Desempenho de Sistemas de Irrigação I: A experiência inicial do Serviço de Assessoramento ao Irrigante – SAI, no Distrito de Irrigação do Baixo Acaraú. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada, v.5, p. 265-271, 2011

Mantovani EC, Bernardo S, Palaretti LF. Irrigação - Princípios e Métodos. 2. ed. Viçosa: Editora UFV, 2007. v. 1. 358 p.

Mateos L, Identifying a new paradigm for assessing irrigation system performance Irrigation Science, Amsterdam, v. 27, p. 25–34, 2008.

PLAYÁN, E.; MATEOS, L. Modernization and optimization of irrigation systems to increase water productivity Agricultural Water Management, Amsterdam, v. 80, p. 100–116, 2006.

SOUSA, E. C.; SANTOS NETO, A. M.; LIMA, S. C. R. V.; FRIZZONE, J. A.; NASCIMENTO, A. K. S.; BELTRÃO JÚNIOR, J. A. Utilização da tecnologia da informação para o envio de mensagens via SMS ao irrigante: a experiência inicial do projeto SAI. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada, v. 7, p. 224 - 234, 2013

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. The water balance. Climatology, Centerton, NJ. v.8, n.1. 1955.



## MERCADOS INFORMALES, INTERCAMBIOS Y CESIONES DE AGUA DE RIEGO EN LA COMUNIDAD VALENCIANA

*García-Mollá, M.<sup>1</sup>, Sanchis-Ibor, C.<sup>2</sup>, Torregrosa Martí, T.<sup>3</sup>, Sevilla Jiménez, M.<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>Profesora titular, Centro Valenciano de Estudios del Riego, Universitat Politècnica de València, [mgarmo@esp.upv.es](mailto:mgarmo@esp.upv.es)

<sup>2</sup> Investigador, Centro Valenciano de Estudios del Riego, Universitat Politècnica de València, [csanchis@hma.upv.es](mailto:csanchis@hma.upv.es)

<sup>3</sup>Profesora titular, Departamento de Análisis Económico Aplicado, Universitat d'Alacant, [teresa.torregrosa@ua.es](mailto:teresa.torregrosa@ua.es)

<sup>4</sup>Catedrático, Departamento de Análisis Económico Aplicado, Universitat d'Alacant, [martin.sevilla@ua.es](mailto:martin.sevilla@ua.es).

### Resumen

A inicios de la pasada década la legislación española de aguas incorporó diversos cambios normativos para permitir la realización de cesiones e intercambios de recursos hídricos entre concesionarios y usuarios, con el ánimo de flexibilizar la asignación de recursos y mejorar su aprovechamiento, particularmente en contextos de escasez. Sin embargo, como ya han apuntado diversos autores, con anterioridad a estos cambios legales ya existían fórmulas de cesión e intercambio de recursos entre usuarios, más o menos formales. El objetivo del presente trabajo es analizar las cesiones e intercambios de aguas que han tenido lugar en la Comunidad Valenciana en las últimas décadas. Los resultados demuestran que los intercambios de derechos entre usuarios pueden resultar eficaces para resolver problemas locales de escasez. El trabajo discute también el concepto de mercados informales y si estos intercambios o cesiones pueden considerarse como tales.

### 1- Introducción

La asignación del agua en España ha sido tradicionalmente realizada bajo los preceptos del modelo de oferta (Carles Genovés, 2001). En este modelo el objetivo fundamental era llevar al agua al usuario con un coste bajo para fomentar el despegue económico. En coherencia con este modelo, la asignación de recursos se realizaba -y se sigue realizando- mediante el sistema concesional. En este sistema las concesiones son generosas y los precios son bajos para fomentar el crecimiento económico. Por el contrario, es un sistema poco flexible y poco eficiente económicamente.

El crecimiento de las demandas de agua para riego y para otros usos ha hecho que en las cuencas del sur y del este mediterráneo se llegue al “cierre de cuenca” (Palomo-Hierro & Gómez-Limón, 2014). Según Molle et al., (2010) esta situación de cierre de cuenca se alcanza cuando los compromisos adquiridos con los usuarios no se cumplen durante todo el año. En este contexto no se pueden aumentar demandas sin disminuir otras ya existentes (Falkenmark & Molden, 2008) y continuar con el modelo de oferta únicamente incrementaría la presión sobre los recursos existentes (Molle et al., 2010).

En estas circunstancias deben buscarse nuevos instrumentos de asignación del recurso que permitan la flexibilización de las concesiones y que faciliten una asignación más eficiente del



recurso. Los mercados de agua son un instrumento, relativamente reciente, que trata de mejorar la eficiencia sin que disminuyan los beneficios de los derechos de los poseedores de los derechos de propiedad. Dinar et al. (1998) enumeran las ventajas e inconvenientes del mercado como mecanismo de asignación del agua. Entre las ventajas de este mecanismo está el aumento de beneficios que puede experimentar el comprador y vendedor. En caso de que las transacciones sean del ámbito agrario al urbano puede disminuir la contaminación relacionada con el exceso de riego y puede inducir a mejorar la tecnología de riego, ya que informa a los usuarios sobre el coste de oportunidad. Entre las desventajas que estos autores encuentran están las dificultades para medir el agua, definir los derechos de propiedad, identificar y compensar a los terceros afectados y las externalidades, así como las posibles degradaciones ambientales. Otro problema surge de la dificultad de establecer mercados globales limitándose las posibilidades a mercados locales.

La aprobación de la Ley 46/1999 estaba encaminada a dotar de mayor flexibilidad al sistema permitiendo a los poseedores de concesiones venderlas temporalmente a otros concesionarios de mayor o igual rango al precio que acuerden mutuamente. Además la Ley prevé la creación de los bancos de agua o centros de intercambio. Los centros de intercambio pueden funcionar únicamente en situaciones excepcionales en las que los organismos de cuenca pueden realizar una oferta pública de adquisición de derechos a un precio determinado para, después, realizar una oferta pública de venta de todos o parte de los volúmenes adquiridos. Desde su aprobación la actividad de estos mercados ha sido escasa (Palomo-Hierro, Gómez-Limón & Riesgo, 2015) y, aunque tanto el número como los volúmenes intercambiados aumentaron durante la sequía 2005-2008, los volúmenes intercambiados no llegaron al 1% de los consumidos en las zonas receptoras (Garrido, Rey, & Calatrava, 2012). Según Hernández-Mora y De Stefano (2013) esto puede deberse a las reticencias de los agricultores con derechos tradicionales de uso de agua, ya que estarían poniendo de manifiesto que las concesiones existentes exceden a sus necesidades reales.

Pero tradicionalmente los agricultores han buscado métodos de flexibilizar el rígido sistema concesional existente, como las subastas de agua o cesiones de agua entre usuarios de una misma comunidad de regantes o entidades cercanas en momentos de sequía (Torregrosa 2009; García Mollá, 2000). Algunos de estos intercambios han sido definidos como mercados informales. Según Hernández-Mora y De Stefano (2013) los mercados informales son aquellas operaciones de compra-venta de agua que se producen al margen de los supuestos que contempla la legislación de aguas vigente y en ocasiones sin control por parte de la administración competente. Afectan tanto a derechos privados de aguas subterráneas como a aguas sujetas a concesión u otros títulos de aprovechamiento. Estas transacciones se producen en aquellas zonas donde las administraciones públicas no han podido dar respuesta a los problemas locales de escasez.

Los mercados informales han sido empleados en muchos países como Australia, India, Pakistán o Méjico (Brozovic, Care, & Sunding, 2002; Meinzen-Dick, 1998; Rosegrant & Binswanger, 1994; Saleth, 1998). Habitualmente se llevan a cabo mediante simples acuerdos entre regantes en los que la administración prácticamente no interviene y con unos costes de transacción muy pequeños. Los mercados formales, sin embargo, han sido menos implementados ya que requieren que los derechos al uso del agua estén claramente definidos y registrados y su uso controlado y medido (Bjornlund, Nicol, & Klein, 2009). Esto implica que se debe llegar a acuerdo más complejos, con costes de transacción más elevados y con una intervención directa de las administraciones públicas que es cuanto menos complicada en los países en desarrollo (Bjornlund, 2004).



El objetivo de esta comunicación es estudiar cuatro casos de acuerdos de cesión o compraventa de aguas entre usuarios agrarios o entre usuarios agrarios y urbanos en la Comunidad Valenciana en las últimas décadas. Buena parte de estas transacciones se han producido sin que sea necesaria la intervención de la administración, a veces buscando fórmulas legales diferentes a los supuestos contemplados para el intercambio de recursos por la Ley de Aguas y otras simplemente al margen de este ordenamiento.

## **2- Las cesiones de agua entre usuarios agrarios.**

### **2.1- Las cesiones de aguas superficiales sobrantes en entidades de riegos tradicionales.**

Los procesos de expansión histórica de los regadíos valencianos de aguas superficiales se desarrollaron, desde época islámica y hasta el siglo XIX, sobre espacios en los que ya existían pequeñas áreas regables dispersas abastecidas por aguas subterráneas. En la mayoría de los casos, estos sistemas de riego se conectaron e integraron en las redes de agua superficial. Sin embargo, en los humedales costeros del golfo de Valencia, estos micro sistemas de riego mantuvieron su independencia institucional, aunque desarrollaron una dependencia creciente de los caudales sobrantes o “caigudes” del riego superficial. Hoy día subsisten entidades de riego de este tipo vinculadas a tres regadíos de aguas superficiales, los de la Acequia Real del Júcar (ARJ), las acequias de la Vega de Valencia y la Real Acequia de Moncada (RAM).

En el área regable de la ARJ subsisten dos entidades de riego independientes, la Acequia de la Huerta de Sollana y el Sindicato de las Partidas Arroceras de Albalat de la Ribera. En ambos casos se trata de entidades de riego con pequeñas concesiones de aguas subterráneas en surgencias naturales, cuyos caudales han mermado notablemente por la explotación del acuífero de la Plana de Valencia mediante pozos. A efectos prácticos ambas se abastecen de forma permanente casi exclusivamente de los caudales que les proporciona la ARJ, el riego se coordina entre ambas instituciones sin que exista ningún compromiso escrito para la cesión de recursos. La transformación del área regable de la ARJ a riego localizado, actualmente en marcha, va a suponer un cambio en estos procedimientos. En el caso de Albalat de la Ribera, las tierras de huerta y cítricos van a proceder a la implantación del riego localizado y a integrarse a todos los efectos en la ARJ, mientras que el arrozal mantendrá su independencia y el procedimiento tradicional de cesión de recursos. La Acequia de la Huerta de Sollana no ha sido incluida en los planes de modernización de la ARJ y no está prevista su integración en esta institución, por lo que queda pendiente para el futuro como se resolverá su abastecimiento una vez que los sectores contiguos de la ARJ adopten el riego presurizado.

En la Huerta de Valencia, existen dos tipologías de cesiones. Por un lado, comunidades de regantes constituidas como el Sindicato de Riego de la Marjal de Massanassa, que dispone de concesiones administrativas de determinadas fuentes de la marjal de l'Albufera, pero que depende casi en absoluto de los aportes de la Acequia de Favara, derivada del Turia. Este canal también abastece otras dos áreas regables, las cuales carecen de presencia institucional y de concesión administrativa de aguas, se trata de las tierras de la marjal de Sedaví y de la jurisdicción de Francos, Marjales y Extremales de la ciudad de Valencia, también abastecida por la Acequia de Rovella. Estas dos últimas constituyen un caso inusual en el ordenamiento jurídico del riego español, por cuanto la gestión de la zona regable la desarrolla la administración municipal y se carece de concesión administrativa de aguas. Se trata por tanto, de aprovechamientos que mantienen la situación jurídica previa a la Ley de Aguas de 1866 y que no disponen de garantías legales de suministro.

El caso de la Comunidad de Regantes de las Tierras Arrozales de El Puig, enclavada en la RAM, presenta una génesis más compleja y se halla en una situación más conflictiva. Las tierras de la RAM se dividían históricamente en dos sectores, el “jovedat” con derechos plenos de usos de aguas, y el “extremal” con derecho a uso de aguas sobrantes (Sales, 1986). Las tierras dedicadas al arroz en el extremal de El Puig, debido a la necesidad de mecanismos específicos de gestión del riego, constituyeron en 1890 la Comunidad de Regantes de las Tierras Arrozales de El Puig a partir de unas escuetas concesiones de aguas subterráneas. Para proceder a la inundación primaveral del arrozal, se estableció un procedimiento denominado la “retancà” que permitía cerrar durante dos días todas las tomas de la RAM para ceder el agua a estas partidas de marjal. El pasado siglo, al regularse el río Turia con el embalse de Benagéber, se incrementó la garantía de suministro y se pudo proceder a la completa integración del extremal en la RAM mediante un proceso que ha estudiado Sales (in fieri). La integración del extremal no implicó ni la supresión de la *retancà*, ni la desaparición de la comunidad de regantes del arrozal. Como consecuencia de ello, estas tierras están hoy día adscritas a dos comunidades de regantes y reciben recursos de ambas, situación que queda fuera del ordenamiento jurídico de aguas.

## 2.2- Las ventas de aguas residuales entre comunidades de regantes.

A inicios de la década de 1980, ante la necesidad de dar salida a los caudales que iban a ser tratados por la estación depuradora, un grupo de propietarios agrarios del municipio negoció con el Ayuntamiento de Torreveija la cesión de dichas aguas para su uso agrícola. Construyeron una estación de bombeo y una red de canales para su distribución, repartiendo los costos entre los interesados. A éstos se les añadieron algunos pequeños propietarios cuyas tierras resultaron afectadas por el trazado del sistema de riego, los cuales se interesaron en aprovechar estos recursos para el riego. En 1982, los regantes comenzaron a recibir aguas residuales depuradas, pero no fue hasta la década siguiente, en 1994, cuando constituyeron la Comunidad de Regantes de Torremiguel, a fin de legalizar la este aprovechamiento y conseguir la concesión administrativa de caudales.

La comunidad de regantes disponía inicialmente de una concesión de las aguas residuales depuradas, otorgada por el Ayuntamiento de Torreveija, por un volumen de 2.140.000 m<sup>3</sup>. Sin embargo, el acelerado desarrollo urbano de Torreveija incrementó considerablemente el efluente de la estación depuradora, que hubo de ser ampliada en dos ocasiones, en 1990 y 1994. En consecuencia, los caudales administrados por la comunidad de regantes también fueron aumentando, haciendo necesaria la actualización de la concesión administrativa. Así en 2003, la concesión otorgada por la Confederación Hidrográfica del Segura se elevó hasta los 5.446.000 m<sup>3</sup> anuales, a razón de unos 6.800 m<sup>3</sup>/ha/año. Sin embargo, el ritmo de crecimiento de Torreveija, que entre 1982 y 2012 pasó de 12.321 a 103.720 habitantes, hizo que con anterioridad a la actualización de la concesión, ya se superara con creces el volumen del efluente reutilizado. En el año 2002, con 50.953 habitantes, ya se habían absorbido más de 6.000.000 m<sup>3</sup> y se esperaba un incremento continuado de los recursos, en paralelo al crecimiento urbano de dicho núcleo turístico-residencial.

La concesión de aguas de la EDAR de Torreveija eximía a los regantes de efectuar pago alguno por los caudales recibidos, de modo la comunidad podía distribuir agua a muy bajo coste a sus usuarios. Sin embargo, a su vez, la comunidad de regantes se comprometía a utilizar la totalidad de los caudales, y por tanto evitar su vertido a la línea de costa, a fin de garantizar la calidad de las aguas de las playas. Debido al desorbitado crecimiento de Torreveija, el cumplimiento de esta condición comenzó a resultar complicado, porque el efluente estaba superando la capacidad de absorción de las fincas agrícolas y los cuatro campos de golf abastecidos por la comunidad, y no se disponía de autorización de vertido.

Por ello entre los años 2000 y 2007, la comunidad optó por vender agua a las comunidades de regantes vecinas de Campo de Salinas y San Miguel de Salinas, pertenecientes a la zona regable de La Pedrera, vinculada al Trasvase Tajo-Segura. Estas ventas se produjeron en un contexto de enorme escasez en la cuenca del Segura. Inmediatamente, otras comunidades de la zona regable se interesaron por estos recursos. En consecuencia, se construyó una red de canalizaciones para hacer posible la redistribución de los excedentes de la estación depuradora a otras entidades, como a la comunidad de regantes de Santo Domingo, también perteneciente a la Comunidad General de Usuarios de la Zona Regable de La Pedrera. Estas aguas se pagaban, mediada la pasada década a 0,10 €/m<sup>3</sup>, precio que consideraba el valor de venta del agua y los costes de elevación.

Finalmente, en 2007, la Confederación Hidrográfica del Segura regularizó esta situación mediante una reordenación de los derechos concesionales de la EDAR de Torrevieja, otorgando una concesión administrativa de 1'77 hm<sup>3</sup> anuales a la Comunidad General de Usuarios de la Zona Regable de La Pedrera. De este modo, mediante la adscripción de la concesión a la comunidad general, se paralizaron las operaciones de venta.

### **3- Las transacciones entre usuarios agrarios y urbanos**

#### **3.1- Cesiones de aguas subterráneas para abastecimiento urbano**

Los acuíferos de la cuenca del Vinalopó han sido, históricamente, una de las principales fuentes de aprovisionamiento urbano de la ciudad de Alicante y de otras áreas urbanas de su entorno metropolitano. El desarrollo de los regadíos de aguas subterráneas del Alto Vinalopó, singularmente durante en la segunda mitad del siglo XX, permitió la movilización de importantes volúmenes de recursos y facilitó el establecimiento de acuerdos entre las entidades de riego de la comarca y la empresa Aguas Municipalizadas de Alicante (AMA), con el fin de transferir recursos hacia los abastecimientos que atiende esta empresa en la comarca del Vinalopó Mitjà (Petrer, Novelda y Monforte del Cid) y en el área metropolitana de Alicante. Dos comunidades de regantes históricas de la comarca, las de la Vall de Beneixama y la Huerta y Partidas de Villena, facilitan hoy día el abastecimiento de poblaciones. Para la transferencia de estos recursos, los regantes y la empresa de abastecimientos optaron por la fórmula de la constitución de comunidades de usuarios.

La Comunidad de Regantes de la Vall de Beneixama, abrió en 1970 el pozo de Saleretes, en término de Camp de Mirra, constituyendo la comunidad de bienes Valle de Beneixama junto a la empresa Aguas Municipalizadas de Alicante. La concesión administrativa permite la extracción de 2 hm<sup>3</sup> anuales, de los cuales 0'5 hm<sup>3</sup> corresponden a la comunidad, que actualmente no los emplea, mientras que los restantes 1'5 hm<sup>3</sup> son utilizados por AMA. En este caso, dado que la comunidad de regantes no hace uso de su concesión, la gestión es ejecutada por la empresa de abastecimiento, por lo que no existen pagos o compensaciones por la explotación del pozo.

Por su parte, la comunidad de regantes de Huerta y Partidas de Villena es propietaria de 7 pozos, con unos derechos concesionales que ascienden a 14,5 hm<sup>3</sup>. De ellos, 7'2 hm<sup>3</sup> están asignados a una comunidad de usuarios que constituyen esta entidad de riegos y AMA desde el año 2003. En este caso, la comunidad de regantes es la que explota todos los pozos. Se ha reservado 3'325 hm<sup>3</sup> para uso agrícola y los restantes 3'875 hm<sup>3</sup> están destinados a los abastecimientos urbanos. Las tarifas de aguas reflejan un mecanismo de compensación por los gastos de explotación: AMA paga a 0'168 €/m<sup>3</sup> los 3'875 hm<sup>3</sup> que recibe anualmente, mientras que el costo del agua del mismo pozo para los socios de la comunidad de regantes es de 0'072 €/m<sup>3</sup>. La diferencia en la asignación de los costes de obtención del recurso entre el abastecimiento y el riego refleja una proporción de 2,3 a 1,

cifra notablemente inferior a que la que suele aplicarse en el cálculo de los cánones y tarifas públicas.

### **3.2- Las cesiones de aguas en el Consorcio de Aguas de la Marina Baixa**

La comarca de la Marina Baixa, al noreste de la provincia de Alicante, es uno de los nueve sistemas de explotación de la Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ). Ocupa 625 km<sup>2</sup> y presenta una marcada dualidad geográfica, con una zona interior de relieves escarpados y alturas superiores a los 1.000 m en numerosas cotas, y unos piedemontes costeros masivamente ocupados por urbanizaciones turísticas de baja y alta densidad, como Altea, Benidorm o La Vila Joiosa.

La mayoría de los recursos hídricos son de procedencia subterránea, aproximadamente un 60%, a los que hay que añadir un 30% de origen superficial y un 10% de aguas reutilizadas. Las fuentes de suministro son igualmente variadas. Los recursos subterráneos proceden las unidades hidrogeológicas de Aitana, Serrella-Aixortà-Algar y Orxeta; las aguas superficiales de los ríos Algar, Amadorio, Sella y Guadalest; y en cuanto a las aguas reutilizadas, proceden casi exclusivamente de tres EDAR, las de Benidorm, Altea y La Vila Joiosa.

En 1977, en un contexto de extrema sequía, la CHJ, la Diputación de Alicante y diversos municipios de la comarca crearon el Consorcio de Aguas de la Marina Baja (CAMB) con el objetivo de desarrollar, de forma coordinada, una adecuada gestión integrada de los recursos hídricos, a fin de satisfacer las demandas crecientes del consumo urbano sin desatender las necesidades agrícolas de agua.

El principal reto era poder cubrir adecuadamente los picos de demanda estacional –principalmente veraniega–, generados por el núcleo de Benidorm y las áreas turísticas de su entorno. Durante estos periodos, los recursos concesionales asignados a los abastecimientos urbanos no eran suficientes para atender las demandas, por lo que era necesario movilizar nuevos recursos o hacer un uso más eficiente de los existentes. La forma de satisfacer estas necesidades puntuales era emplear el efluente de las depuradoras de las grandes zonas urbanas para el riego agrícola, con el fin de liberar parte de las aguas subterráneas para su uso en los abastecimientos urbanos.

En consecuencia, desde 1978 –y hasta nuestros días– el CAMB y las comunidades de regantes firman contratos privados de intercambio para proceder a la cesión a las zonas urbanas del agua subterránea asignada legalmente a los agricultores. No son contratos de cesión de derechos tal y como establece el artículo 67.1 del TRLA, ya que no existe esa cesión temporal de derechos, no estableciéndose además m<sup>3</sup> intercambiados, precio de esos caudales, frecuencias, etc, sino que únicamente se establece, en ocasiones, el volumen máximo a intercambiar, la asignación económica que recibe la comunidad de regantes por parte del CAMB para el mantenimiento de infraestructuras y sufragar gastos relacionados.

Los volúmenes máximos varían anualmente en función de las disponibilidades de agua depurada, de las necesidades mensuales de agua para abastecimiento urbano, del régimen de lluvias, del mes del año, etc. En periodo estival son más elevados, ya que coinciden las bajas precipitaciones con los picos de la campaña turística y la de riegos. Las estimaciones de los volúmenes habitualmente objeto de intercambio, basadas en el consumo de aguas reutilizadas por parte de las comunidades de regantes, superan los 7 hm<sup>3</sup> anuales, teniendo el CAMB una capacidad de hasta 9 hm<sup>3</sup> para suministrar a los regantes. En algunas





comunidades de regantes como la de Villajoyosa, los recursos depurados han llegado a suponer el 70% de las aguas consumidas (Torregrosa, 2009).

Estos intercambios también requieren de unas infraestructuras hidráulicas (estaciones de bombeo, embalses reguladores, conducciones de aguas blancas y conducciones de aguas depuradas) que han sido posibles gracias al soporte financiero del CAMB. Además, para mejorar la gestión integrada de recursos, el CAMB ha adquirido derechos de agua, que son destinados tanto a los abastecimientos municipales, como a los regantes que participan de los mecanismos de compensación de usos de las aguas.

#### 4- Discusión y conclusiones

Las experiencias de cesiones e intercambios de aguas recogidas en este trabajo son una buena muestra de la capacidad de los regantes para alcanzar acuerdos que dan soluciones locales, permanentes o temporales, a determinados problemas de gestión del recurso, con independencia de la regulación que pueda establecerse en el marco jurídico del agua. También son un claro exponente de su aptitud para optimizar el aprovechamiento de los recursos hídricos. Los casos analizados merecen una consideración separada, por cuanto existen importantes diferencias, en su origen y en su naturaleza, entre las cesiones de aguas superficiales de los regadíos tradicionales del llano Júcar-Turia y los intercambios de aguas de las comarcas alicantinas.

Respecto a los regadíos tradicionales del Júcar y el Turia, nos hallamos ante una práctica plurisecular que ha encontrado diversas articulaciones institucionales, en casi todos los casos al margen de la legislación. Se trata de cesiones de agua sin compensación económica y que pese a su dilatada perduración en el tiempo, no han merecido su reconocimiento por la vía concesional.

La dependencia de muchos regantes respecto a estos recursos sobrantes les sitúa en una posición de debilidad, acentuada en aquellas zonas, como en los francos y marjales de Valencia y Sedaví, donde los usuarios no se han constituido en comunidad de regantes. De hecho, concesiones fluviales efectuadas con posterioridad a estos usos, anteriores y posteriores a la regulación fluvial, han permitido que otros usuarios les adelantaran en la prelación de usos, pese al principio *prior in tempore, potior in iuris*. Su integración en las comunidades de regantes que les suministran agua, como sucedió en algunos casos (acequias de Rascanya o Moncada), hubiera sido la opción más favorable a sus intereses. Las causas por las que algunas de estas entidades se integraron y otras no, merecen ser objeto de un estudio histórico e institucional más detallado (Sales, *in fieri*).

Pese a que las modestas dimensiones de estos riegos no suponen un problema relevante de gestión, la integración sigue siendo la opción más recomendable en la actualidad, singularmente en un contexto en el que la reducción de las superficies regadas debería estimular los procesos de revisión concesional. Además, como ha sucedido en el caso de Albalat de la Ribera (ARJ), las iniciativas de modernización del regadío deben servir para reducir la atomización de la gestión del riego y facilitar estos procesos de integración. Carece de sentido en todo caso la situación inusual, y de difícil justificación legal, de la comunidad de las Tierras Arrozales de El Puig, cuya área regable se solapa con la de la RAM. Una razón importante que aflora en este caso y que explica algunos de estos comportamientos, es la existencia de expectativas urbanísticas, que lleva a los responsables de algunas de estas pequeñas entidades a defender su independencia, a fin de obtener





beneficios económicos en caso de expropiación de la superficie ocupada por la red de riegos y drenajes.

El caso de los intercambios y compra-venta de recursos de las comarcas alicantinas difiere sustancialmente de los anteriores. En todos estos ejemplos, el origen del intercambio de recursos se encuentra en el crecimiento de las áreas urbanas y al desarrollo del sector turístico. La irrupción de centenares de miles de nuevos usuarios urbanos ha generado una nueva necesidad –agua potable– y un nuevo recurso –aguas residuales–, redibujando el equilibrio entre oferta y demanda en varias comarcas alicantinas. Los intercambios identificados en estas tierras son en definitiva una adaptación de la gestión a un nuevo escenario hídrico, en la que las comunidades de regantes han desempeñado un papel clave, en tanto en cuanto ostentaban la titularidad legal de la mayor parte de los derechos de aguas.

En los ejemplos estudiados la rigidez que planteaba el régimen concesional se ha sorteado con diversos mecanismos para facilitar, con el concurso de los nuevos recursos –y el apoyo económico de la administración, en el caso del CAMB–, una gestión más eficaz. En el caso de Torrevieja se produce una respuesta de los usuarios a un problema coyuntural, que la administración ha reconducido por la vía de la asignación de nuevas concesiones. Los casos del Vinalopó y la Marina Baixa son acuerdos estables, de larga duración, en los que los usuarios han arbitrado compensaciones económicas a la explotación, cesión o sustitución de recursos. Son respuestas bien adaptadas a las condiciones y necesidades locales, que resultan satisfactorias para los usuarios y les otorgan agilidad y flexibilidad en la gestión, evitando controles y rigideces administrativas.

Pero los casos analizados, ¿Pueden considerarse mercados? Si seguimos los criterios aplicados por Hernández-Mora y De Stéfano (2012), podrían considerarse como tales. Sin embargo, por la escasa concurrencia de competidores y el limitado alcance de la oferta apenas si presentan las características que otros autores (Naredo, 2008) conceptualizan como mercado. Lo cierto es que si comparamos los casos aquí analizados con algunos de los que han sido expuestos (Meinzen-Dirk, 1988; Saleth, 1998; Bjornlund, 2004), aflora una significativa distancia en la oferta, la demanda y el volumen de transacciones. También el uso del término informales puede suscitar cierta controversia, por cuanto Bjornlund (2004) ha establecido la distinción entre mercados formales o informales en función del tipo de transferencia, permanente o temporal, de derechos de uso. Sin embargo, en España, se halla más extendido el uso de este término en función de si los intercambios siguen o no las fórmulas introducidas en la legislación de aguas en 1999. Todo esto probablemente hace necesario un análisis comparativo más amplio a fin de establecer una tipología más detallada de cesiones, intercambios y mercados.

Dejando de lado estos matices conceptuales, cabe hacer una valoración positiva de estas experiencias, que se han mostrado eficaces para resolver problemas locales. No obstante, sería recomendable, en estos y en otros casos de intercambios de recursos, un mayor control administrativo para evitar que se produjeran afecciones a terceros o impactos ambientales debido al cambio de uso del agua. La transparencia en la gestión de los recursos, que al fin y al cabo son públicos, es una cuenta pendiente de la administración del agua en España, y ésta atañe no solo a los organismos públicos, sino también a los aprovechamientos colectivos de titularidad privada.

## Bibliografía

- Bjornlund, H. (2004). Formal and informal water markets: Drivers of sustainable rural communities? *Water Resources Research*, 40, 1–12. doi:10.1029/2003WR002852



- Bjornlund, H., Nicol, L., & Klein, K. K. (2009). The adoption of improved irrigation technology and management practices-A study of two irrigation districts in Alberta, Canada. *Agricultural Water Management*, 96, 121–131. doi:10.1016/j.agwat.2008.07.009
- Brozovic, N., Care, J. M., & Sunding, D. L. (2002). Trading activity in an informal agricultural water market: an example from California. *Journal of Contemporary Water Research and Education*, 121, 3–16.
- Carles Genovés, J. (2001). La Administración Pública ante las nuevas políticas de aguas de la Directiva Marco. *II Congreso Ibérico Sobre Planificación Y Gestión de Aguas*. Oporto 2001.
- Dinar, A.; M. W. Rosegrant y R. Meizen-dick (1998) Water allocation mechanisms- principles and examples. *World Bank. Agriculture and Natural Resources Department*
- Falkenmark, M., & Molden, D. (2008). Wake Up to Realities of River Basin Closure. *International Journal of Water Resources Development*, 24(2), 201–215. doi:10.1080/07900620701723570
- García-Mollá, M. (2000). Análisis de la influencia de los costes en el consumo de agua en la agricultura valenciana. Caracterización de las entidades asociativas para riego, Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de València.
- Garrido, A., Rey, D., & Calatrava, J. (2012). Water trading in Spain. *Water, agriculture and the environment in Spain: can we square the circle*, 205-216.
- Hernández-Mora, N., & De Stefano, L. (2013). Los mercados informales de aguas en España: una primera aproximación, 1–28.
- Meinzen-Dick, R. S. (1998). Groundwater markets in Pakistan: Institutional development and productivity impacts. In *Markets for Water* (pp. 207-222). Springer US.
- Molle, F., Wester, P., & Hirsch, P. (2010). River basin closure: Processes, implications and responses. *Agricultural Water Management*, 97(4), 569–577. doi:10.1016/j.agwat.2009.01.004
- Naredo, J. (2008). Lo público y lo privado, la planificación y el mercado, en la encrucijada actual de la gestión del agua en España. *Panel Científico-Técnico de Seguimiento de La Política* .... Retrieved from [http://www.fnca.eu/phocadownload/P.CIENTIFICO/inf\\_mercado.pdf](http://www.fnca.eu/phocadownload/P.CIENTIFICO/inf_mercado.pdf)
- Palomo-Hierro, S., & Gómez-Limón, J. A. (2014). El papel de los mercados como instrumento para la reasignación del agua en España. *Agua y Territorio*, 1(2), 78-92.
- Palomo-Hierro, S., Gómez-Limón, J., & Riesgo, L. (2015). Water Markets in Spain: Performance and Challenges. *Water*, 7(2), 652–678. doi:10.3390/w7020652
- Rosegrant, M., & Binswanger, H. (1994). Markets in tradable water rights: potential for efficiency gains in developing country water resource allocation. *World Development*. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0305750X94000751>



Torregrosa, T. (2009). *La gestión del agua en la Marina Baja (Alicante)* Temas de las Cortes Valencianas, nº 19.

Sales Martínez, V. (1988). La cuestión del extremal en el regadío de la Real Acequia de Moncada. *Cuadernos de Geografía*, 44, 221–234.

Sales Martínez, V. (in fieri). Las ampliaciones modernas en los regadíos históricos: el caso del extremal de la Acequia de Moncada, Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València.

Saleth, R. (1998). Water markets in India: economic and institutional aspects. *Markets for Water*. Retrieved from [http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-0-585-32088-5\\_12](http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-0-585-32088-5_12)



## EXPERIENCIAS DEMOSTRATIVAS SOBRE LA GESTIÓN SOSTENIBLE DEL USO DEL AGUA DE RIEGO, PARA REDUCIR EL GASTO ENERGÉTICO Y LAS EMISIONES DE GEI

*Goñi Labat, M. (1), Puig Arrastia, J.(2), Ederra Gil, I. (3)*

<sup>1</sup> Técnico de Sección de Proyectos y Obras Privados, División Riegos e Infraestructuras, INTIA, [mgoni@intiasa.es](mailto:mgoni@intiasa.es)

<sup>2</sup> Jefe de Sección de Proyectos y Obras Privados, División Riegos e Infraestructuras, INTIA, [jpuig@intiasa.es](mailto:jpuig@intiasa.es)

<sup>3</sup>Técnico de Sección de Asistencia Técnica a Explotación y Empresas Agrícolas, División ITG (Innovación, Tecnología y Gestion), INTIA, [iederra@intiasa.es](mailto:iederra@intiasa.es)

### Resumen

La elección de un marco de riego y el estudio de materiales que permitan reducir las pérdidas de carga de una instalación, de manera que se consiga reducir la demanda de presión y por tanto la factura eléctrica con la misma efectividad de riego es clave, teniendo en cuenta que su vida útil es mayor de 20 años. Esto supondrá un ahorro continuado en el tiempo de explotación de la instalación. Además de este factor energético, es crucial determinar la Huella de Carbono de las instalaciones de riego, así como establecer la comparativa de la Huella de Carbono de los materiales utilizados en los dos marcos de riego (18 x 15T vs 12 x 15T) con sus diferentes variantes de instalación.

### 1) Introducción, Objetivos

Una parte importante de las zonas que tienen implantados sistemas de riego a presión son dependientes de energía. El coste económico que supone este consumo, en aquellos regadíos dependientes de energía, es cada vez mayor, de hecho los costes energéticos han ido aumentando de manera constante durante los últimos años.

Por otra parte, el cambio climático sigue siendo una preocupación a nivel mundial para gobiernos, empresas y ciudadanos y es el cálculo de la Huella de Carbono la herramienta que da respuesta a los motivos de dicha modificación climática.

El objetivo general de este trabajo es la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a través de la reducción del gasto energético que supone una gestión sostenible del agua de riego. Se establecen tres ámbitos de estudio:

#### 1.1.- Ámbito Parcela de Riego

Los objetivos principales de este ámbito son fundamentalmente tres; en primer lugar comparar los marcos de riego 18 x 15T vs. 12 x 15T en distintas condiciones de viento con el objetivo de determinar la uniformidad de riego de ambos y además realizar la comparativa entre los marcos de riego 18 x 15T vs. 12 x 15T desde el punto de vista económico y de materiales. La segunda parte consiste en obtener una clasificación energética del sistema de riego en función de los materiales empleados y finalmente se calcula la Huella de

Carbono de todos los materiales, así como de los marcos de riego estudiados en este ámbito.

### 1.2.- Ámbito Red Colectiva de Riego.

En este ámbito se estudia la repercusión, tanto desde el punto de vista económico como medioambiental, que tendría en el cálculo de una Red de Riego Colectiva el menor requerimiento de presión necesaria en cabecera de parcela, dato obtenido en el Ámbito Parcela.

### 1.3.- Ámbito Global

En este ámbito se relacionan todos los conceptos estudiados, tanto a nivel de parcela y de red colectiva de riego, con el objetivo de una vez contempladas las distintas variantes estudiadas poder determinar qué diseño global es el más eficiente desde el punto de medioambiental y poder determinar de esta manera la Huella de Carbono del conjunto.

## **2) Materiales y métodos**

### 2.1.- Ámbito Parcela.

#### *2.1.1.- Comparativa de marcos de riego 18 x15T vs 12 x 15T.*

##### *a) Análisis de Uniformidad de riego.*

La comparación de marcos (18 x15T vs 12 x 15T) en función de la uniformidad de riego se realiza mediante ensayos de pluviometría. La experiencia consiste en instalar en un mismo sector de riego los dos marcos de riego y en cada uno de ellos colocar una malla de pluviómetros, una por cada marco de riego, con un espaciamiento entre los pluviómetros de dos metros. La superficie a abarcar con la malla es como mínimo la del marco de riego a estudiar. La duración del ensayo es de 1 hora, según la norma internacional ISO 7749-2. Cada 10 minutos se toman medidas de velocidad con la ayuda de un anemómetro.

Al colocar las dos mallas en un mismo sector de riego, los ensayos se realizan simultáneamente; de esta forma se consigue que la influencia del viento sea la misma para ambos marcos. Las presiones de prueba son de 25, 28, 30, 32 y 34 m.c.a. con 3 repeticiones para cada presión, excepto en el caso de presión de 30 m.c.a., para el que se realizaron 4 repeticiones debido a las condiciones de viento elevado en dos de los ensayos.

El tamaño de las boquillas de los aspersores utilizados varía según el marco de riego (Tabla 1).

**Tabla 1.** Características de los aspersores

	MARCO 12 X 15T	MARCO 18 X 15T
BOQUILLAS ASPERSOR CIRCULAR	3,5 mm y 2,4 mm	4,4 mm y 2,4 mm
BOQUILLA ASPERSOR SECTORIAL	3,5 mm	4 mm
PLUVIOMETRÍA	6,50 l/m2h	6,63 l/m2h

La uniformidad de riego se mide mediante el Coeficiente de uniformidad de Christiansen (CU).



Como software se ha utilizado la aplicación informática CATCH 3D (Sprinkler Catch Can overlap Program, Richard G. Allen, Biological and Irrigation Engineering Department. Utah State University, Logan, Utah U.S.A.).

*b) Análisis económico y de materiales.*

Para realizar esta comparativa se diseñan en total 144 ha, 72 ha con el marco de riego 12 x 15T y 72 ha con el marco de riego 18 x 15T. Las parcelas elegidas están ubicadas en la zona regable de la primera fase del Canal de Navarra. En total son 22 unidades de riego con superficies que van desde 5 ha hasta 10,5 ha.

Para el diseño del marco 12 x 15T se supone que se parte de una presión disponible en cabecera de 5 m.c.a. menos que para el marco 18 x 15T y las mismas condiciones de caudal en hidrante para ambos marcos.

El Software utilizado para el diseño hidráulico de las parcelas es el programa WCADI (Weizman-Computer Aided Design Irrigation).

*2.1.2. - Clasificación energética*

Para desarrollar este apartado se realizan ensayos de pérdidas de carga para diferentes materiales empleados en las instalaciones de riego en parcela:

Se prueban cuatro tipos de conexiones de hidrante:

- Conexión de PE Ø 110 PN 16 SDRM y Conexión de PE Ø 125 PN 16 SDRM.
- Conexión de calderería 3" y Conexión de calderería 4".

Y cinco tipos de nudos de válvulas:

- Nudo de válvulas de PE Ø 90 PN 16 SDRM, PE Ø 110 PN 16 SDRM y PE Ø 125 PN 16 SDRM
- Nudo de válvulas de calderería 3" y de calderería 4"

Estas pruebas se llevan a cabo en el Banco de Ensayo que la empresa AGUACANAL (Sociedad Concesionaria del la primera fase del Canal de Navarra) tiene instalado en la Zona regable del Canal de Navarra). Se ha seguido el mismo esquema de colocación que tiene lugar al acometer una cobertura de riego en parcela. Se colocan 2 manómetros de presión, uno aguas arriba de las conexiones/nudos y el otro manómetro aguas abajo y se va variando el caudal circulante desde 5 l/s hasta 34 l/s. Para cada tratamiento, se van anotando las medidas de presión. La diferencia entre estas dos medidas nos dará la pérdida de carga de la instalación.

*2.1.3.- Cálculo Huella de Carbono*

Para establecer la comparativa de la Huella de Carbono de los materiales utilizados en los dos marcos de riego a estudiar se calcula la huella de Carbono llamada "cradle-to-gate" (desde el nacimiento hasta la puerta), donde incluiríamos las emisiones aportadas desde la producción de las materias primas, su transporte desde el origen a la fábrica, el proceso de transformación, hasta la salida de fábrica.

El cálculo de la Huella de Carbono se ha realizado mediante la siguiente fórmula:





HC= Datos de actividad (unidad de masa, km...) x Emisión de CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub> equivalente por unidad de actividad).

Para definir los datos de actividad, se calculan los kg de todos los materiales que intervienen en la instalación de riego, en unidad de kg/ha de riego instalada. Para ello, se seleccionan una muestra de materiales cuyas características son representativas de los materiales utilizados con distintas alternativas y variables en la instalación.

El análisis se realiza en una muestra de 22 unidades de riego, 144 ha, con superficies que van desde 5 ha hasta 10,5 ha. Estas unidades se estudian con los marcos de riego de 12 X 15T y 18x15T y la tipología de las parcelas elegidas se pueden considerar representativas de la zona regable del Canal de Navarra. Dentro de estos dos marcos se estudiarán también las distintas alternativas de materiales empleados en la instalación de riego.

Existen diferentes fuentes donde recopilar los factores de emisión de CO<sub>2</sub>. En este estudio se utilizan los datos provenientes del banco BEDEC del ITeC (Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña).

## 2.2.- Ámbito Red Colectiva de Riego.

Para el desarrollo de este apartado se analizan tres alternativas distintas para el diseño y funcionamiento de las redes colectivas, en cuanto al valor de consigna considerado en el hidrante (presión aguas arriba de hidrante).

- 54 m.c.a. en los hidrantes (Alternativa A). correspondiente al marco 18 x 15T.
- 49 m.c.a. en los hidrantes desfavorables de la red (Alternativa B)
- 49 m.c.a. en los hidrantes (Alternativa C). correspondiente al marco 12 x 15T.

La zona seleccionada es la zona regable del Canal de Navarra en su primera fase, con una superficie de 22.444 hectáreas (dato 2014). Se han estudiado 26 redes colectivas que suman 754 Km de tuberías y 3.621 hidrantes.

El Software utilizado es el paquete de simulación de sistemas presurizados de distribución de agua "GESTAR 2010 – PREMIUM", orientado al diseño y análisis de sistemas de riego mediante un interface gráfico. El simulador genera 1.000 escenarios aleatorios de hidrantes abiertos y cerrados, en el "diseño original" de la red, para un grado de simultaneidad de la demanda fijado en 30% y para las tres variantes de consigna de presión en hidrantes (alternativa A, B y C). El software simula el funcionamiento de la red, determinando las presiones disponibles en cada hidrante y encuentra los casos críticos que presentan alarmas (presión disponible inferior a la consigna en hidrante).

Con los datos del dimensionado de la red en las tres alternativas (A, B y C), se conseguirán resultados comparativos en cuanto a los siguientes apartados:

### *2.2.1. Cálculo de la Huella de Carbono*

El cálculo de la Huella de Carbono de la red colectiva de riego se ha realizado al igual que en el apartado 2.1.3. mediante la siguiente fórmula:

HC= Datos de actividad (unidad de masa) x Emisiones de CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub> equivalente por unidad de actividad).

Para definir los datos de actividad, se calculan los kilogramos de todos los materiales que intervienen en las redes de riego calculadas y diferentes alternativas. Este dato obtenido se referencia a kilogramos por hectárea (kg/ha) y los factores de emisión de CO<sub>2</sub> se obtiene del banco BEDEC del ITeC (Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña).

### 2.2.2. Optimización económica

En este apartado se determina la repercusión económica que tendría el dimensionado de la red colectiva bajo las tres alternativas de presión descritas y el efecto económico que estas presiones de consigna supondrían en la factura eléctrica, año tras año.

### 2.3.- Ámbito Global

Para determinar la diferencia de emisiones de CO<sub>2</sub> que supondría diseñar toda una zona Regable con el marco de riego 12 X 15T respecto al marco 18x 15T se consideran tres factores:

2.3.1.- Variación de emisiones de CO<sub>2</sub> en instalación en parcela entre los dos marcos de riego.

$$\frac{\frac{\text{kgCO}_2}{\text{ha}} \text{ para } 18 \times 15T - \frac{\text{kgCO}_2}{\text{ha}} \text{ para } 12 \times 15T}{\text{vida útil (30 años)}}$$

2.3.2.- Variación de emisiones de CO<sub>2</sub> en la red colectiva de riego entre las dos alternativas de presión.

$$\frac{\frac{\text{kgCO}_2}{\text{ha}} \text{ para PC } 54 \text{ m.c.a.} - \frac{\text{kgCO}_2}{\text{ha}} \text{ para PC } 49 \text{ m.c.a.}}{\text{vida útil (30 años)}}$$

2.3.3.- Termino energético. Variación en la altura de bombeo.

Para conocer el factor de conversión entre Kwh y Kg CO<sub>2</sub> se ha utilizado la Fuente del Observatorio de la Electricidad de WWF.

## 3) Resultados y discusión

### 3.1.- Ámbito parcela

#### 3.1.1.- *Comparativa de marcos de riego.*

##### a) *Análisis de Uniformidad de riego.*

En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos en los ensayos. Para presiones en boquilla de 25 m.c.a. se observa que el CU da valores más altos para el marco de riego 12 x 15 T tanto en presencia como en ausencia de viento. Con vientos fuertes de 7 m/s la diferencia de CU es de 2 puntos entre ambos marcos pero los valores de uniformidad son muy bajos. Con vientos débiles de 0.36 m/s, la diferencia de CU es de 3.4 puntos entre ambos marcos.

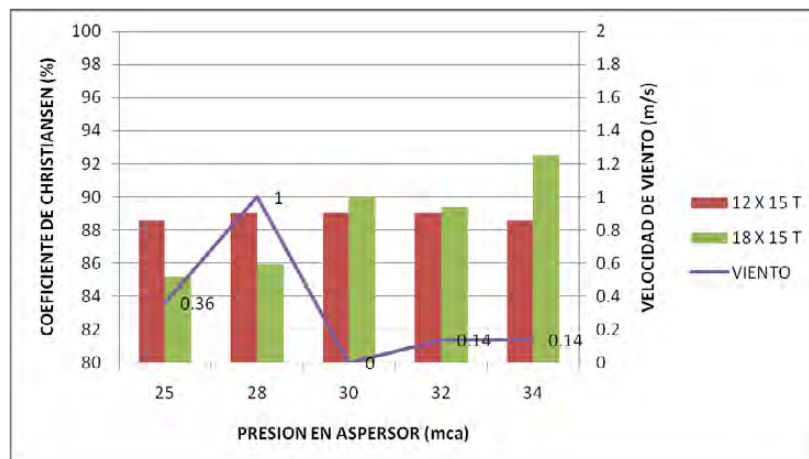
Para presiones en boquilla de 28 m.c.a. se observa que el CU da valores más altos para el marco de riego 12 x 15 T tanto en presencia como en ausencia de viento siendo la diferencia de CU de 3 puntos.

**Tabla 2.** Coeficientes de uniformidad de los ensayos

Presión	Marco	Viento (m/s)	CU	Presión	Marco	Viento (m/s)	CU
2.5	12x15	7.35	70.00%	3.0	12x15	7.00	72.40%
2.5	18x15	7.35	67.90%	3.0	18x15	7.00	65.80%
2.5	12x15	0.36	88.60%	3.0	12x15	0.00	88.30%
2.5	18x15	0.36	85.20%	3.0	18x15	0.00	91.80%
2.5	12x15	2.36	78.50%	3.2	12x15	0.86	84.10%
2.5	18x15	2.36	73.60%	3.2	18x15	0.86	87.60%
2.8	12x15	5.85	89.20%	3.2	12x15	0.93	89.10%
2.8	18x15	5.85	86.00%	3.2	18x15	0.93	92.80%
2.8	12x15	1.00	89.00%	3.2	12x15	0.14	89.00%
2.8	18x15	1.00	85.90%	3.2	18x15	0.14	89.40%
2.8	12x15	5.28	74.10%	3.4	12x15	2.29	81.70%
2.8	18x15	5.28	76.90%	3.4	18x15	2.29	83.60%
3.0	12x15	0.00	89.10%	3.4	12x15	0.14	88.60%
3.0	18x15	0.00	90.00%	3.4	18x15	0.14	92.50%
3.0	12x15	6.50	71.90%	3.4	12x15	1.93	88.90%
3.0	18x15	6.50	69.50%	3.4	18x15	1.93	90.20%

Para presiones en boquilla de 30 m.c.a. se observa diferencia en los CU entre los dos marcos en presencia o ausencia de viento, de manera que para vientos fuertes de 6.5 m/s y 7 m/s se obtiene mejor uniformidad con el marco 12 x 15T, siendo la diferencia de CU de 2.4 y de 6.6 puntos respectivamente. En ausencia de viento, los valores más altos de uniformidad se obtienen con el marco de riego 18 x 15T, con una diferencia de 3.5 y 0.9 puntos con el marco de riego 12 x 15T. Para presiones en boquilla de 32 m.c.a. todos los ensayos se realizaron con vientos débiles y en todas las repeticiones el valor más alto de CU fue para el marco de riego 18 x 15 T, estando la diferencia en torno a 3-4 puntos. Para presiones en boquilla de 34 m.c.a., se observa que el CU da valores más altos para el marco de riego 18x15 tanto en presencia de viento moderado como en ausencia de viento con una diferencia de 2 y 4 puntos respectivamente. Destacar que los valores de uniformidad para el marco 12 x 15Tson más estables frente a las variaciones de presión.

En la Figura 1 se representa la comparativa de CU para vientos débiles.



**Figura 1.** Comparativa de CU para diferentes presiones con vientos débiles.

c) *Análisis económico y de materiales.*

La variación entre los dos marcos se muestra en la Tabla 3.

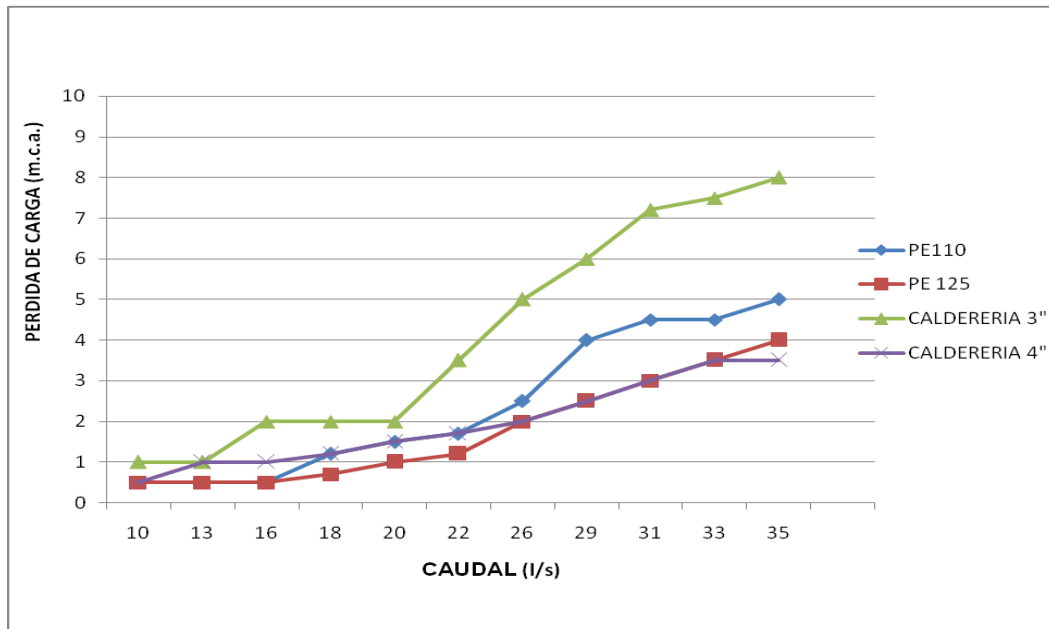
**Tabla 3.** Resumen de materiales para los marcos 12 x 15T y 18 x 15T

		MEDICIONES		COMPARATIVA DEL 12 X 15T FRENTE AL 18 X 15T
		<b>12 X 15T por ha</b>	<b>18 X 15T por ha</b>	%
m.	APERTURA DE ZANJA PARA PVC/PE EN COBERTURAS	204.60	203.36	1%
Ud.	HOYO PARA ASPERSOR	63.58	44.45	43%
m.	COLOCACION TUBERIA POLIETILENO	628.64	610.20	3%
m.	TUBERIA DE PVC $\varnothing 63$ mm. - 0.6	42.47	36.02	18%
m.	TUBERIA DE PVC $\varnothing 75$ mm. - 0.6	33.46	29.10	15%
m.	TUBERIA DE PVC $\varnothing 90$ mm. - 0.6	43.35	41.35	5%
m.	TUBERIA DE PVC $\varnothing 110$ mm. - 0.6	19.30	25.28	-24%
m.	TUBERIA DE PVC $\varnothing 125$ mm. - 0.6	57.71	61.34	-6%
m.	TUBERIA DE PVC $\varnothing 140$ mm. - 0.6	22.16	22.63	-2%
m.	TUBERIA DE PVC $\varnothing 160$ mm. - 0.6	1.77	1.64	8%
m.	TUBERIA DE POLIETILENO	666.11	651.01	2%
Ud.	CONEXIÓN 80/100mm	0.17	0.17	0%
Ud.	DESAGÜE DE SECTOR $\varnothing 50$ mm.	1.49	1.49	0%
Ud.	VALVULA HIDRAULICA 3" SIMPLE (80 mm)	0.36	0.36	0%
Ud.	VALVULA HIDRAULICA 3" DOBLE (80 mm)	0.32	0.32	0%
Ud.	VALVULA HIDRAULICA 4" SIMPLE (100 mm)	0.07	0.07	0%
Ud.	VALVULA HIDRAULICA 4" DOBLE (100 mm)	0.07	0.07	0%
Ud.	COMPLEMENTO VÁLVULA HIDRAÚLICA 80 ó 100 mm	0.30	0.30	0%
Ud.	ASPERSOR CIRCULAR C.E.	50.97	34.42	48%
Ud.	ASPERSOR SECTORIAL 1000 L/H	12.61	10.03	26%
Ud.	CAÑA PORTAASPERSOR	63.58	44.45	43%
Ud.	CHAPA PROTECTORA EN ASPERSOR	5.25	4.31	22%
Ud.	PROGRAMADOR ELECTRONICO HASTA 12 SECTORES	0.17	0.17	0%
Ud.	SOLENOIDE TIPO LATCH	1.48	1.48	0%

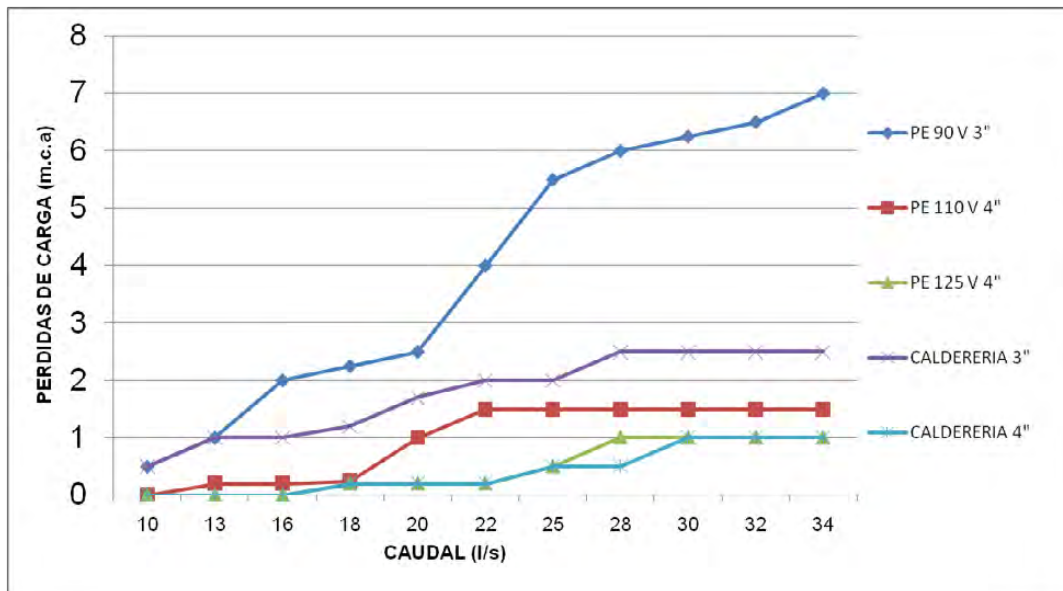
A nivel de económico, la instalación del marco de riego 12 x 15T supone un aumento de coste de un 12,76% con respecto al marco 18 x 15T.

### 3.1.2. – Clasificación energética

La pérdida de carga de las conexiones de hidrante se muestra en la Figura 2 y la de los nudos de válvulas en la Figura 3.



**Figura 2.** Pérdida de carga en conexiones de hidrante



**Figura 3.** Pérdida de carga en nudos de válvulas

### 3.1.3.- Cálculo Huella de Carbono

Los materiales empleados en la instalación de riego en parcela par el marco 18 x 15T suponen un total que oscila entre 558,16 kg/ha (alternativa con conexiones y nudos en PE 110) y 594,03 kg/ha (alternativa con conexiones y nudos en calderería 110) mientras que para el marco de riego 12 x 15T se obtienen valores entre 597,96 kg/ha (alternativa con conexiones y nudos en PE 110) y 633,83 kg/ha (alternativa con conexiones y nudos en calderería 110).

En la tabla 4 se muestra el resultado de la Huella de Carbono para los marcos de riego 18 x 15T y 12 x 15T con las distintas alternativas de instalación:

**Tabla 4.** Emisiones de CO<sub>2</sub> para 18 x 15T y 12 x 15T

	18 X 15T	12 X 15T
ALTERNATIVAS	kg CO <sub>2</sub> /ha	kg CO <sub>2</sub> /ha
TOTAL ALTERNATIVA 1 (HID DE 3" Y PE 110 mm)	6.145,24	6439.36
TOTAL ALTERNATIVA 2 (HID DE 3" Y PE 125 mm)	6244.79	6538.91
TOTAL ALTERNATIVA 3 (HID DE 4" Y PE 110 mm)	6138.31	6432.43
TOTAL ALTERNATIVA 4 (HID DE 4" Y PE 125 mm)	6243.88	6538,00
TOTAL ALTERNATIVA 5 (HID DE 3" CON CALDERERIA DE 90 mm)	5906.64	6200.76
TOTAL ALTERNATIVA 6 (HID DE 4" CON CALDERERIA DE 110 mm)	5960.07	6254.19
TOTAL ALTERNATIVA 7 (HID DE 3" CON CALDERERIA DE 110 mm)	5964.11	6258.23

Para todas las alternativas estudiadas el valor de las emisiones de CO<sub>2</sub> en el marco 18 x 15T es menor que en el marco 12 x 15T, siendo el mayor valor de huella de carbono el correspondiente a la alternativa con conexiones y nudos en PE 125, y el menor el correspondiente a la alternativa con conexiones y nudos en calderería de 90 mm. Los valores para el marco 18 x 15T oscilan entre 5.906,64 kg CO<sub>2</sub>/ha y 6.244,79 kg CO<sub>2</sub>/ha mientras que para el marco de riego 12 x 15T se obtiene valores entre 6.200,76 kg CO<sub>2</sub>/ha y 6.538,91 kg CO<sub>2</sub>/ha.

### 3.2.- Ámbito Red Colectiva de Riego.

#### *3.2.1. Cálculo de la Huella de Carbono*

Con el diseño de la alternativa C (tras reducir la presión de consigna en hidrante en 5 metros) se reduce la Huella de Carbono un 10,09 % de media respecto a la emisión de CO<sub>2</sub> de los materiales empleados en la alternativa A. Si se traduce este dato por hectárea, supondría una emisión de 402,76 kg CO<sub>2</sub> menos al pasar a la alterativa C. Cuando únicamente se reduce la presión de consigna en los hidrantes desfavorables (paso de la alternativa A a la alternativa B) el ahorro de Huella de carbono no resulta significativo.

#### *3.2.2. Optimización económica*

Al volver a dimensionar las redes tras reducir la presión de consigna en hidrante en 5 m.c.a. (paso de la alternativa A a la alternativa C) se consigue un abaratamiento en el coste de la red del 5%, de media. Cuando únicamente se reduce la presión de consigna en los hidrantes desfavorables (paso de la alternativa A a la alternativa B) el abaratamiento no resulta significativo.

Por otro lado, en redes dependientes de la energía para su funcionamiento, disminuir la altura de bombeo en 5 metros también implica un importante ahorro en la factura eléctrica, año tras año. En el 53% de las redes colectivas a presión en Navarra es necesaria una potencia media instalada de 1,54 Kw/ha y un consumo medio de energía de 1.543 Kwh/ha/año (datos 2009) para una altura media de bombeo de 94 m.c.a., siendo el ratio de 16,41 Kwh/m.c.a. por ha y año. En consecuencia, se puede pensar en una cifra de ahorro anual de 11 €/ha.

### 3.3.- Ámbito Global

Según los cálculos obtenidos, el paso de un marco de riego 18 X 15T a un marco de 12 X 15T en un regadío dependiente de energía, supondría un ahorro global de CO<sub>2</sub> de:





Ahorro Global de CO<sub>2</sub>= -9,8 kg CO<sub>2</sub>/ha y año + 13,42 kg CO<sub>2</sub>/ha y año +13,73 kg CO<sub>2</sub>/ha y año = 17,35 kg CO<sub>2</sub>/ha y año

#### 4) Conclusiones y recomendaciones

- En redes de riego existentes, el marco de riego 12 x 15T se consolida como una alternativa para presiones de funcionamiento en aspersor desde 25 a 30 m.c.a., presentando altos valores de uniformidad, y siendo estos más estables frente a las variaciones de presión que los valores del marco 18 x 15T.

- El valor de la pluviometría es muy similar en ambos marcos (6,63-6,5 l/m<sup>2</sup> h).

- A nivel de parcela, la instalación del marco 12 x 15T supone un encarecimiento del 12,46% con respecto al 18 x 15T, pero este encarecimiento se verá compensado durante el tiempo de explotación de la parcela. La mayor diferencia entre ambos marcos en cuanto a materiales se da en la partida de aspersores tanto circulares como sectoriales y derivado de esto en el número de cañas, hoyos y chapas de sectoriales.

- Las opciones más eficientes desde el punto de vista de pérdidas de carga serían las instalaciones de PE 125 mm y la calderería de 110 mm.

- Desde el punto de vista exclusivamente de materiales, el cambio de un marco de riego 18 x 15T a un marco 12 x 15T, se traduce en un incremento de Huella de Carbono de 294 kg CO<sub>2</sub>/ha (aproximadamente 5%). El mayor valor de Huella de Carbono, desde el punto de vista de materiales, es el correspondiente a la alternativa con conexiones y nudos en PE 125.

- A nivel de red colectiva de riego, reducir la presión de consigna en hidrante en 5 m.c.a. se traduce en una reducción de la Huella de Carbono en un 10,09 % de media respecto a la emisión de CO<sub>2</sub> de los materiales empleados en la alternativa con 5 m.c.a. más. Si traducimos este dato por hectárea, supondría un ahorro de 402,76 kg CO<sub>2</sub>.

- En redes nuevas de riego el proyectista dispondrá de una nueva herramienta para el diseño (marco 12 x 15T y marco 18 x 15T); el dimensionamiento de la red para el marco 12 x 15T equivaldría a un ahorro de presión de 5 m.c.a.; reducir el valor de consigna en hidrante en 5 metros, supondría un abaratamiento en el coste de la red del 5%, de media y de 11 €/ha y año en la factura eléctrica (en redes dependientes de energía).

- En regadíos dependientes de energía, el ahorro global de CO<sub>2</sub> que supondría pasar de un diseño de parcelas con el marco de riego 18x15T a 12x 15T considerando tanto el término de materiales como el energético sería de 17,35 kg CO<sub>2</sub>/ha y año.

#### 5) Bibliografía

- M. P. Mercader, A. Ramirez de Arellano, M. Olivares (2012). Modelo de cuantificación de las emisiones de CO<sub>2</sub> producidas en edificación derivadas de los recursos materiales consumidos en su ejecución. *Informes de la Construcción*, 64, 401-414.
- P. Planells, J.F. Ortega, M. Valiente, J. Montero y J.M. Tarjuelo (1999). Criterios para el diseño de redes colectivas de riego. *Ingeniería del agua*, 6, 27-36.
- G. Garcia, (2013). Huella de Carbono. Asociación Española para la calidad AEC.
- J.A. Rodríguez Díaz (2009). Alternativas para el ahorro energético en redes de riego a presión. *Jornadas Ingeniería del Agua*. Madrid.
- El diseño de proyectos y su relación con el ahorro energético.
- Nery Zapata (2014). *Jornadas Riegos del Alto Aragón*. Huesca.



XXXIII Congreso Nacional de Riegos  
Universitat Politècnica de València, Valencia 2015  
DOI:<http://dx.doi.org/10.4995/CNRiegos.2015.1448>

La innovación en el regadío. Nuevas tecnologías y optimización del binomio agua-energía.  
Enrique Playán Jubillar (2014). XIII Congreso Nacional de Comunidades de Regantes.  
Huelva.



## ASPECTOS LEGALES Y NORMATIVOS DE LA MODERNIZACION DE REGADIOS

*J. Pastor Madalena*

Licenciado en Derecho por la Universidad de Valencia. Abogado en Ejercicio. Socio de Abogados Pastor y Asociados S.L. Secretario y Letrado de la Acequia de Mislata (integrante del Tribunal de las Aguas de la Vega de Valencia) Letrado asesor de la Federación de Comunidades de Regantes de la Comunidad Valenciana. Plaza de Manises nº 2 puerta 10, 46003 Valencia. Correo electrónico: Javier@apy.es

### Resumen

La modernización de regadíos se está implantando en las colectividades de usuarios del agua gracias a la constante mejora tecnológica, y esto es posible porque esta mejora tecnológica lleva implícita una importantísima repercusión económica en el rendimiento de los cultivos, ya sea por ahorro de costes o por mejoras de producción. Tampoco es nada desdeñable reconocer que a su vez implica una importante mejora en la calidad de vida de los agricultores. Las colectividades de usuarios, las Comunidades de Regantes y demás entidades de riego, forman un variopinto espectro de formas de organización por lo que deberíamos preguntarnos cuál de ellas es o son las más adecuadas para gestionar con la máxima eficacia los importantes avances tecnológicos de los que se pueden llegar a disponer. Y en concreto nos preguntamos si las comunidades de regantes podrían ser un corsé que no siempre esté preparado para desde el riego ser capaces de aprovechar técnicas de cultivo en común, y ello porque no se afronten estas modernizaciones desde un elemento vertebrador propio del cultivo en común, incidiendo en la estructura empresarial de la toma de decisiones, sino que de forma indirecta se está aprovechando la implantación de redes de distribución de agua con la modernización del regadío para su implementación en unas organizaciones que tienen su origen en una forma de organización medieval. En este trabajo vamos a analizar por un lado la necesidad de adaptación de las normas de la organización a la nueva realidad, y por otro lado, entraremos a valorar si son las comunidades de regantes el tipo de organización óptima para la implantación de la modernización de regadíos.

### Introducción

Para poder entender la situación actual hay que tener en cuenta la situación de partida de la Ley de Aguas de 1.985 origen directo del actual texto refundido, que pretendió reorganizar el derecho de aguas en España, para someter a todo el ciclo hidrológico al control administrativo, con intención de salvaguardar el medio natural, provocando una **demanialización del agua** (que el agua pase a ser pública). Este **sometimiento de la gestión del agua a la idea de ciclo hidrológico** rompe con la tradición de la legislación de aguas en España que partía no sólo del reconocimiento de determinados tipos de agua como privadas, cuyo ejemplo emblemático eran las aguas subterráneas, sino que el otorgamiento de la concesión de aguas públicas significaba una especie de título jurídico habilitante para su disposición por un período limitado, para las nuevas concesiones, que llegaba hasta los cien años, y aunque en principio las concesiones sí tenían un carácter finalista en realidad el concesionario era el que decidía sobre el agua. En ese nuevo contexto legal existen, sobreviven y **se potencian las comunidades de regantes**. Y se



potencian por la nueva legislación al extremo de obligar a constituirse en comunidad de Usuarios (comunidad de regantes pero para cualquier fin de uso del agua), o lo que es lo mismo a constituirse en una corporación de derecho público, para poder acceder al uso del agua.

Para comprender esta limitación sobre la forma de organización que impone la ley para la gestión del agua, basta con repasar las disposiciones transitorias de la ley destinadas a fomentar o favorecer la demanialización del agua desde los derechos privados, lo que se ha llamado como "aguas temporalmente privadas", en definitiva lo único que dicen es que si tú te sometes al régimen de derecho público de las aguas y yo te mantengo que el sistema de organización del uso del agua. Pero la radicalización llega a obligar en constituirse en comunidad de usuarios cuando se altera cualquier circunstancia del aprovechamiento, por mínima e insignificante que parezca.

En resumen nuestra legislación da a entender que la única forma de gestionar el agua es mediante instituciones de raigambre medieval, muy válidas todavía para gran número de situaciones, pero que quizá son obsoletas para afrontar el reto de la modernización, y que entendemos son inadecuadas para afrontar las propuestas de sistemas de cultivo en común.

## **1.- Frente a una realidad de riego no modernizado ¿a qué nos obliga la modernización?**

### **a.- disponibilidad de las aguas**

Afrontar una modernización de regadíos supone la realización de una importante inversión para mejorar la utilización de las aguas, y por tanto, carece de sentido afrontar cualquier inversión si no se tiene garantizada la disponibilidad de las aguas. Además esta disponibilidad de las aguas debe estar **operativa durante el período de amortización de la inversión**, pues es el derecho y el uso del agua el que en su caso garantiza que se pueden afrontar los compromisos adquiridos. Como curiosidad diremos que el actual plan hidrológico de la Demarcación del Júcar sólo permite obtener concesiones para riego por 25 años, lo que haría desaconsejable cualquier inversión del SEIASA, que prevé para sus obras de modernización un período de amortización de 50 años.

### **b.- zona regable y padrón de regantes**

Afrontar una modernización de regadíos comprende una importante inversión económica en la que deben quedar perfectamente **definidos los beneficiarios** de esa modernización y por ende los comuneros sobre los que repercutiremos el coste de las obras. Hay que tener clara la **zona regable** y el compromiso de los usuarios para con los pagos que se deben hacer para abonar el coste que corresponda de las obras. Por ello es preciso aclarar la obligatoriedad de participación en los gastos.

Como consecuencia de ello el padrón de regantes hay que llevarlo con especial pulcritud y esmero, por lo que resulta imprescindible disponer de una programación informática que permita la modernización de los ficheros, con la concreta ubicación y descripción de las parcelas y con unos protocolos de actuación y documentación perfectamente definidos en los que queden perfectamente determinados los títulos de propiedad y las transmisiones que se producen.



En la normativa (ordenanzas y reglamentos) parece aconsejable tener como referencia superficial la del catastro, salvo medición expresa realizada por técnico competente.

### **c.- obligatoriedad de participar en los costes de la inversión**

La pertenencia a una comunidad de usuarios puede ser obligatoria o por y en origen voluntaria. Es obligatoria cuando las tierras están comprendidas dentro de un plan de estado para el caso de nuevos regadíos, o se comprende que así ha sido siempre en el regadío tradicional. Tiene un origen de voluntariedad cuando la comunidad de regantes nace a partir de una fuente de agua que era privada y en la que el uso de las aguas ha dependido del pago de una participación por parte del usuarios.

En ambos casos la repercusión económica respecto de la inversión cuando se solicita la baja se minimiza con la **obligación de pagar todas las cantidades comprometidas** por la comunidad que se contiene en el artículo 212 del Reglamento del Dominio Público Hidráulico (en adelante RDPH). Es decir que si existe en todo caso la obligación de contribuir a los gastos conforme prevé el artículo 82.2 del Texto Refundido de la Ley de Aguas.

La obligatoriedad de participar en la inversión viene a su vez **establecida por una norma reglamentaria** Artículo 201.8.f) del RDPH, pese a lo cual no podemos sino aconsejar que se establezca en estatutos, pues no está claro que las prestaciones obligatorias de contenido económico puedan imponerse por Decreto siendo más correcto a tenor que lo que establece nuestra Constitución que las mismas sean impuestas por la ley. En nuestro caso **los estatutos sí tienen valor de ley para los comuneros** y pueden imponer estas obligaciones porque están autorizados a que así lo hagan por el artículo 82.2 del Texto Refundido de la Ley de Aguas (en adelante TRLA). La ley establece que los estatutos u ordenanzas pueden establecer esta obligación, el RDPH (Decreto del Gobierno de la Nación) dice que aunque no lo digan los estatutos se puede imponer. Sobre esto último es sobre lo que dudamos.

### **d.- policía de aguas, distribución del agua**

La tarea no sólo más importante sino la que justifica la propia esencia de la comunidad de regantes es su función de policía de aguas, a tal extremo, que creemos que la razón de su subsistencia se debe en gran medida al éxito de la fórmula como garante de la distribución de un bien público. El hecho de que desde el poder se haya respetado el poder y potestades de las comunidades de regantes se debe en gran medida a su **eficacia en la resolución y evitación de conflictos**.

Los cambios en las formas de distribución del agua tienen una incidencia máxima en la regulación de dichos cambios, con variación en las obligaciones tanto de la comunidad y su personal como del comunero.

### **e.- comunicación con los comuneros.**

Todas estas nuevas de formas de actuar deben quedar perfectamente delimitadas en la normativa de la Comunidad, ya sean estatutos y reglamentos o en las disposiciones de la Junta de Gobierno, y por tanto hay que dar expresa **validez a las actuaciones vía web** en ambos sentidos, tanto del comunero en su petición de servicios como la comunidad en su



publicación de su prestación de servicios, y publicación de la normativa, así como a las **notificaciones vía correo electrónico**.

Una de las mayores dificultades prácticas que se tienen en la gestión diaria del agua es comunicar a los comuneros usuarios las alteraciones necesarias para la ordenación del riego, como lo sería el cambio de horarios en las sectorizaciones, y su grave incidencia en esta distribución y por ende, en su caso, en la represión de su incumplimiento por parte del jurado de riegos. Por ello las obligaciones de la comunidad, la Junta de Gobierno, y las del comunero deben estar perfectamente detalladas. A mayor modernización, mayor prestación de servicios, y por tanto, mayor responsabilidad de la comunidad frente al comunero.

En todo caso entendemos que las normas de riego vigentes deben estar publicadas en la Web desde su promulgación, siendo deber de los comuneros consultarla periódicamente, aunque también se pueden establecer mecanismos de comunicación electrónica como lo sería por correo electrónico u otro tipo de medio o tecnología.

#### **f.- ocupación de bienes y derechos.**

La modernización de regadíos conlleva también la **necesidad de hacer ocupaciones temporales y servidumbres** definitivas sobre las tierras de los comuneros por lo que propugnamos que esta obligación conste en las ordenanzas y que incluso fuere el Jurado de Riegos el que determine el importe de la indemnización. También se pueden imponer servidumbres de hasta diez metros cuadrados (por ejemplo), o de paso de conducciones, a todos los comuneros **como prestación obligatoria sin derecho a indemnización**. En todo caso sí debe quedar claro en los estatutos el derecho de paso para la comprobación de las redes y su reparación.

#### **g.- nuevas instalaciones, nuevos compromisos de mantenimiento.**

En la modernización de regadíos debe quedar claro que **el mantenimiento de determinadas instalaciones es responsabilidad del comunero** o no, como lo podrían ser los contadores y las que en su caso se determinen.

#### **h.- nuevas instalaciones, nuevas formas de determinar la deuda.**

Otro de los elementos a considerar sería el que quedara establecido en los estatutos un **sistema de estimación objetiva de los consumos de agua** en caso de avería o disfunción de los contadores. Se trataría del caso de que se estropeen los contadores o incluso en el caso de que se intencionadamente se deje inútil su funcionamiento.

#### **i.- nuevas instalaciones, nuevas formas de infringir la normativa, nuevas formas de reinstaurar el orden.**

Las nuevas instalaciones conllevan necesariamente nuevas obligaciones para con la distribución de las aguas, y hacen imprescindible una actualización de **las infracciones** (hechos sancionables) para las que no cabe su corrección si no están **expresamente tipificadas** (descritas), y ello por principio general del derecho penal o sancionador, y en nuestro caso además por disposición expresa de la ley, al final del párrafo del artículo 82 del TRLA: Los estatutos y ordenanzas de las comunidades, en cuanto acordados por su junta general, establecerán las previsiones correspondientes a las infracciones y sanciones que





puedan ser impuestas por el jurado de acuerdo con la costumbre y el procedimiento propios de los mismos, garantizando los derechos de audiencia y defensa de los afectados.

También se hace necesario considerar una **conurrencia de potestades** entre el Jurado de Riegos y la Junta de Gobierno, en tanto que esta última debe cuidar de que se cumplan la normativa y las ordenanzas, establecer turnos de agua conciliando los intereses de los diversos aprovechamientos, así como en períodos de escasez, y dictar las disposiciones sobre la distribución de las aguas. De hecho, es la **Junta de Gobierno** la que lidia día a día con los comuneros, y de alguna forma hay que **dotarla de medios para que resuelva las desavenencias** sin necesidad de que se forme cada vez el Jurado de Riegos.

Ejemplo práctico lo sería cuando hay un sobre consumo de agua sobre la dotación aprobada, que suele ser un hecho no discutido, y que podría estar previsto por los reglamentos, que establecerían unas indemnizaciones directas a aplicar por la junta de Gobierno, que llevaran implícita la cualidad de sanción (por ejemplo pagar el doble por el agua consumida de más), con lo que serían corregidas de forma rápida y eficaz, al ser mejor aceptadas por el comunero. En caso de no resultar aceptadas siempre se podría recurrir al **Jurado de Riegos**.

## 2.- Las oportunidades que nos brinda la modernización.

Las obras de modernización suelen brindar nuevas oportunidades a la mejora y calidad de la gestión por **las innovaciones en los programas de gestión**, el uso de internet al **mejorar el archivo de documentación** (altas y bajas, acceso a catastro), **ejercicio de derechos** como el de participación en asambleas y el derecho de voto, **peticiones telemáticas de agua**, situación e información sobre **necesidades de nuestra parcela (como grados de humedad) etc..** A título de ejemplo podemos destacar:

**archivo de documentación:** Títulos de propiedad, pólizas de seguros, contratos de mantenimiento, licitaciones y contratos de obras, contratos de servicios, altas y bajas de los comuneros, acceso a catastro....

**contabilidad:** Aprovechar hacer mejoras en el control contable y económico es un acicate más, añadida a la propia modernización, para que las comunidades de regantes lleven una contabilidad moderna adaptada al plan general, y de la que sea fácil extraer en cada momento el compromiso adquirido por la comunidad y su repercusión por la unidad de superficie o derecho de agua en el que se determinen los derechos y obligaciones de los comuneros en la comunidad.

**gestión de expedientes:** Los artículos 82 y 83 del TRLA confieren a las Comunidades de Regantes de importantes potestades públicas, pero también les imponen las obligaciones propias de la Administración Pública, con su expreso sometimiento a la Ley 30/1992 de Procedimiento Administrativo común, como lo es para la tramitación de los expedientes o peticiones. Dentro de ellos llama especialmente la atención los expedientes que se deben tramitar cuando se exige responsabilidad patrimonial de las administraciones públicas, del que como curiosidad diremos es una excepción más a la tutela del Organismo de cuenca sobre las comunidades de usuarios (la primera serían las resoluciones del jurado de riegos) y que en el fondo las convierte un poco más en auténticas administraciones públicas.

Entendemos que en los programas informáticos de las comunidades de regantes pueden implementarse estos procedimientos para facilitar la gestión de los mismos y su archivo.



**domiciliación bancaria y cobros de recibos:** También es conveniente poner en los estatutos la obligación de domiciliación bancaria de los diferentes recibos, ya que es habitual este sistema de gestión de los recibos de repercusión de costes a los comuneros.

**publicación en la Web:** Entendemos que las normas de riego vigentes deben estar publicadas en la Web desde su promulgación, siendo deber de los comuneros consultarla periódicamente, aunque también se pueden establecer mecanismos de comunicación electrónica, como lo sería por correo electrónico u otro tipo de medio o tecnología. Este tema lo reiteramos aquí por lo que pudiera entenderse de no imprescindible, por cuanto sí en todo caso es muy conveniente, y por lo tanto debe darse rango estatutario a estas obligaciones de la comunidad y de los comuneros o usuarios.

**peticiones de agua y conocimiento de las necesidades de nuestra parcela:** Los actuales sistemas de modernización contemplan también un amplio espectro de información para que el comunero pueda adoptar decisiones de cultivo, pero en particular de riego, como por ejemplo lo sería conocer las condiciones de humedad ambiente o del terreno. Los sistemas informáticos permiten en la actualidad hacer que la información que antes se gestionaba individualmente, y sólo por unos pocos, se haga de forma colectiva y pueda llegar a todos los usuarios, con lo que las decisiones para el cuidado de las parcelas serán más acertadas.

Pero ello también comporta unas obligaciones para con la comunidad y con ello unas responsabilidades para con los comuneros, ambas deben quedar reflejadas en estatutos.

### **control de acceso y votos en la junta general**

También la modernización debe ser aprovechada para implantar sistemas de control de acceso a los recintos donde se celebran las Junta Generales, y mejorar la rapidez y fiabilidad de los recuentos de votos y de elección de cargos. Sobre este particular aconsejamos incluso la conveniencia de hacer un reglamento de votaciones y elecciones.

### **3.- las fusiones de comunidades o usuarios del agua.**

La modernización de regadíos en sí misma no tendría por qué alterar las fuentes u origen de las aguas, pero es bastante común que ésta modernización de regadíos se afronta desde una perspectiva de obtención de nuevos caudales y de fusión de entidades de riego.

Las obras de modernización de regadíos pueden significar una conexión de redes de distribución de agua, una utilización de nuevas fuentes u orígenes del agua, lo que la ley de Aguas llama utilización conjunta, que de ser la excepción ha pasado a ser la norma.

Como decíamos, la modernización de regadíos también comprende la unificación de los puntos de origen del agua en una misma red, así hay conexiones de pozos, utilización de aguas fluyentes, de aguas regeneradas, aguas trasvasadas, aguas de desalación, aguas pluviales o por condensación, y otras que pudieran existir.

Estas obras de modernización suelen llevar aparejadas nuevas necesidades de gestión provocadas por la necesidad de **coordinar o fusionar a diferentes entidades o usuarios** que con anterioridad tenían una capacidad de gestión totalmente independiente.



Entendemos que cuando existen diversos usuarios de las aguas y se unen en una infraestructura común de utilización de las aguas, la tendencia, atendiendo su tamaño, sería acudir a una comunidad de base, pero como paso previo, o definitivo según los casos, sería la agrupación por constitución de una comunidad general.

La mera constitución de una comunidad general como gestora para la utilización de una obra hidráulica cuando sólo se unifica una de las posibles fuentes u orígenes del agua es un paso importante, pero no alcanza un compromiso de gestión conjunta de todas las aguas, lo que evidentemente si se consigue con una fusión, puede ocasionar a la larga importantes disfunciones, ya que cualquiera de sus componentes puede descolgarse de los demás, por ejemplo al obtener unas aguas de calidad a menor coste, y que se niegue a compartir con los demás. Y además ello perjudica normalmente a los demás si disminuye el consumo de aguas que gestiona la Comunidad General o más aún si pretende separarse del todo.

Las Juntas Centrales de los grandes sistemas de explotación se podrían encontrar en igual tesitura, por lo que habría que plantearse la posibilidad de **vincular el derecho al uso de las aguas a la utilización de la infraestructura hídrica común**. En la actualidad sólo hay una vinculación por las aguas que se gestionan desde la entidad aglutinadora a las que se puede renunciar.

En ningún caso debería admitirse que una entidad o beneficiario lograra sus futuras fuentes de agua desde otro proveedor pues ello distorsiona todo el sistema. Y si no se puede evitar, al menos que quede perfectamente delimitada la cantidad que debe abonar al resto de usuarios por la inversión realizada en su provecho así como por los perjuicios que ocasione.

#### **4.- la búsqueda de la rentabilidad agraria. La empresa agraria.**

Dos grandes posicionamientos agronómicos compiten, y de alguna forma se excluyen, en materia de modernización para colectivos de agricultores, aunque ambas partan de posicionamientos de socialización diferentes.

Si por un lado están los que utilizan la red de riego para introducir abonados, también pretenden la mejora en la productividad agraria desde el punto de vista económico los que defienden los cultivos ecológicos, si bien éstos últimos no han conseguido atraer a los agricultores de forma tan abrumadora como los otros. Lo bien cierto es que para asegurar la mayor productividad y venta, y por tanto para que los cultivos ecológicos resulten más productivos, también necesitarían de técnicas de cultivo en común para su mejor funcionamiento y prevención de plagas, por ejemplo.

Lo único que podemos pretender aquí es llamar la atención sobre este tema dado que entendemos no parece el sistema organizativo de las comunidades de regantes el ámbito adecuado para resolverlo, pues las potestades públicas de las que disponen lo son en virtud de que distribuyen agua pública y no otra cosa. Para aplicar técnicas de cultivo en común, debería haber una expresa manifestación de voluntad obligatoria por parte de la administración, que declarara zonas concretas de cultivo en común, como única alternativa en las zonas donde existe minifundismo, para responder ante las exigencias de los mercados en los que sólo pueden competir empresas agrarias. El grado de implicación o imbricación de estas técnicas de cultivo en común hasta o hacia la empresa agraria es algo que debería ser adaptable a cada realidad.



Desde este punto de vista, la modernización es una oportunidad para la subsistencia de la agricultura, y sólo seremos capaces de aprovecharla en los lugares donde no existe si de la modernización misma surge la empresa agraria.

La empresa agraria que atendiendo el literal de la ley sí que puede ser beneficiaria de las aguas públicas, ya lo fuera como única titular, ya al amparo de lo prevenido en el artículo 62 del TRLA como concesionaria de agua para riego en régimen de servicio público. Empresa que puede ser ajena a la comunidad o formada por todos los posibles usuarios ya fuera mediante la constitución de una SAT u otra forma organizativa.

Dicha empresa respecto del agua tendría el inconveniente de que no dispondría de las potestades públicas de las comunidades de regantes salvo que las mismas pudieran integrarse en la concesión. Entendemos que, entre otros, cabría la obligatoriedad de pertenencia y pago de los compromisos adquiridos en caso de baja, imponer obligaciones de hacer y la posibilidad de la ejecución subsidiaria, ser beneficiarias de expropiación forzosa, y el cobro de deudas por la vía de apremio

Por otro lado no está claro, respecto de estas empresas, que quepa su integración en los planes estatales y allí donde se forzara la constitución de comunidades de usuarios. En la actualidad además no podrían gestionar grandes obras hidráulicas (artº 125 TRLA), tampoco podrían gestionar la desalación (artº 13 TRLA) ni tan siquiera gestionar comunidades con distintos usos de agua. Lo cual entendemos no tiene justificación de ningún tipo.

## **5.- conclusiones y recomendaciones**

1º.- Cualquier modernización de regadíos de colectivos de regantes requiere necesariamente de:

- a.- asegurarse de que se dispone de agua
- b.- adaptar la normativa que garantice la identificación de los comuneros y sus tierras, así como el cobro de los costes repercutidos.
- c.- determinación de las nuevas obligaciones entre la comunidad y los comuneros así como aceptación de las nuevas formas de comunicación.
- d.- tipificación de las infracciones y determinación de las sanciones.

2º.- Toda modernización de regadíos de colectivos de regantes es una oportunidad para informatizar la gestión con la mejora en contabilidad, gestión de expedientes y comunicación con el comunero.

3º.- Toda modernización de regadíos de colectivos de regantes debería contemplar su máxima rentabilidad incluyendo en sus objetivos la implementación de una empresa agraria buscando además para ello el sistema organizativo más adecuado.

4º.- Para el uso de aguas públicas habría que favorecer la concurrencia de otro tipo de organización colectiva en el caso del regadío en concurrencia incluso con otros tipos de uso aunque para ello hubiera que cambiar la actual legislación vigente.

5º.- Debería diseñarse un sistema de adaptación a las técnicas de cultivo en común cuando las parcelas de cultivo no alcancen una cantidad de superficie adecuada, según las zonas, a una gestión empresarial agraria.

**GRUPOS POSTERS**

**POSTERS PRESENTADOS**

---



Pérez-Latorre, F.J.<sup>1</sup>, Peragón, J.M.<sup>1</sup>, Delgado, A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dr. Ingeniero Agrónomo. E.P.S. Linares. Área de Mecánica de Fluidos. Universidad de Jaén, [fjperez@ujaen.es](mailto:fjperez@ujaen.es), C/ Alfonso X El Sabio, 28. 23700 Linares

<sup>1</sup>Doctorando en Aceites de Oliva. Ing. en Geomática y Topografía. EPS Linares. Universidad de Jaén, [jpiuarez@ujaen.es](mailto:jpiuarez@ujaen.es).

<sup>2</sup>Dr. Ingeniero Agrónomo. Departamento de Ciencias Agroforestales, ETSIA, Universidad de Sevilla, [adelgado@us.es](mailto:adelgado@us.es), Ctra. Utrera km 1, 41013 Sevilla.

### INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS

El estudio se lleva a cabo en el olivar de riego de la provincia de Jaén (sudeste de España). Actualmente el principal problema en el mantenimiento a nivel parcela de los riegos de olivar con gotero interlinea es el debido a la obturación de los mismos. Para conocer la magnitud del problema se ha analizado la calidad de las aguas de riego de las zonas estudiadas, pues los problemas de obturación son debidos principalmente a las características de las aguas empleadas. De forma habitual en el área estudiada, se utiliza la inyección de ácido a través de los equipos de fertirrigación instalados en los cabezales de riego, siendo el ácido nítrico el más empleado. Los objetivos del trabajo son:

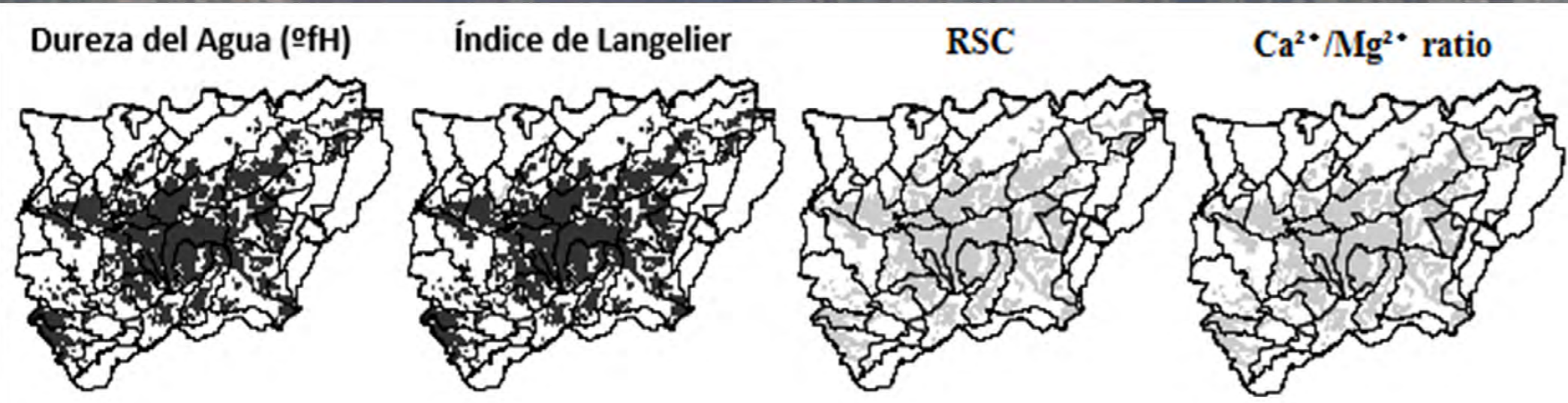
1. Realización de mapas de riesgos de obturación en los sistemas de riego
2. Determinar la cantidad de ácido a añadir para paliar estos efectos.

En ambos casos empleando un software SIG y que permite geoprocursos relacionados con el uso del agua de riego basado en sus propiedades químicas, tanto para las aguas superficiales como para las subterráneas.

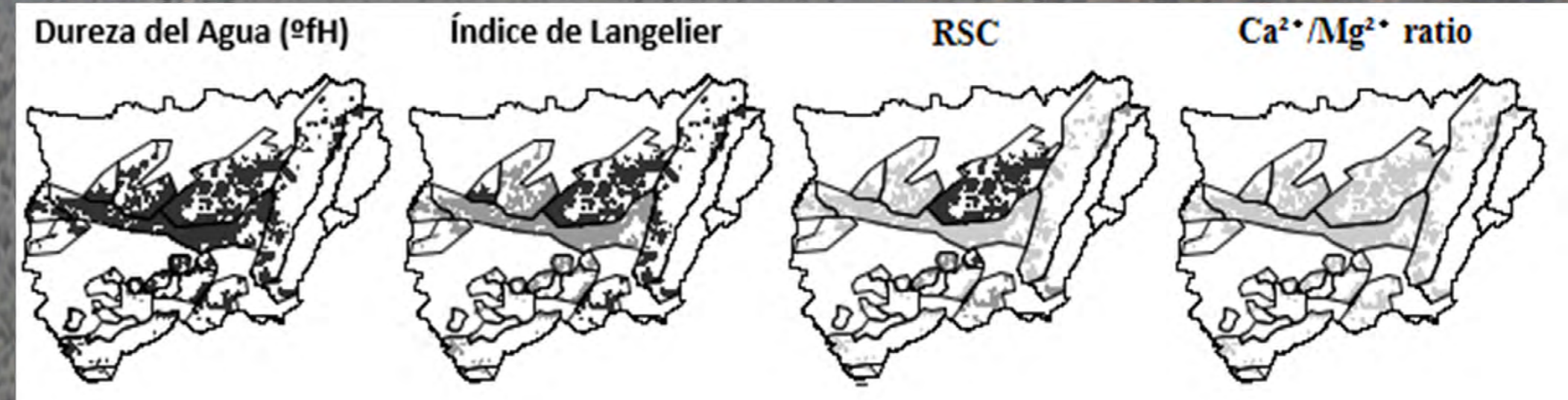
### MATERIALES Y MÉTODOS

Obtención de datos georreferenciados de aquellos índices que predicen la obturación de goteros cuya causa sea la precipitación de  $\text{CaCO}_3$ .

#### SUPERFICIALES



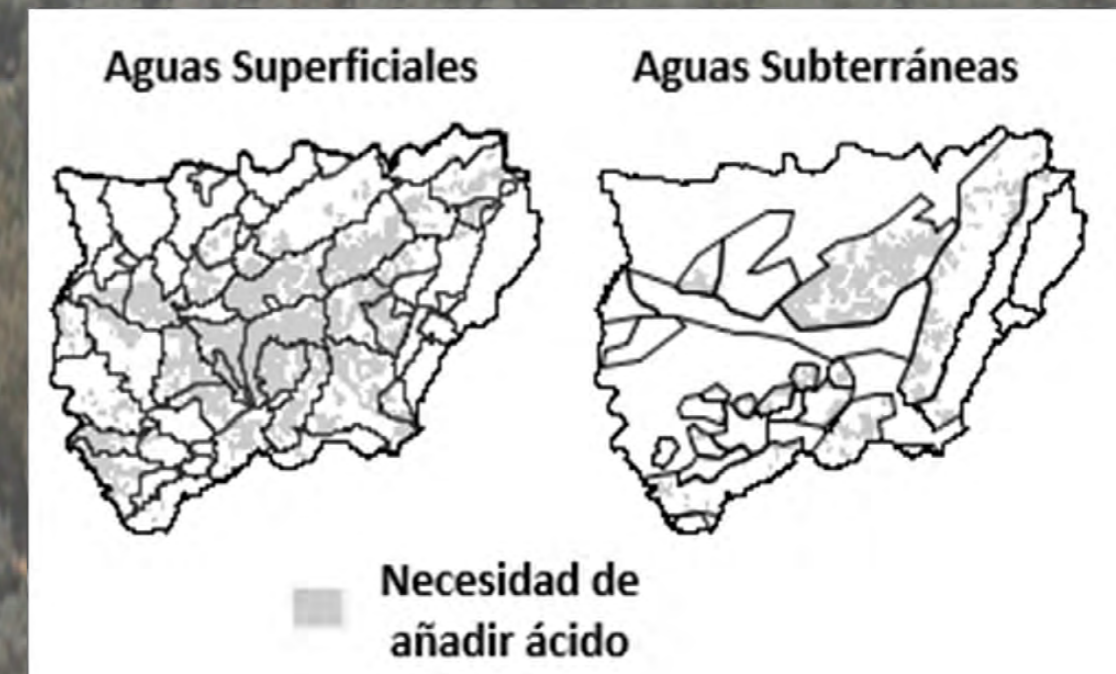
#### SUBTERRÁNEAS



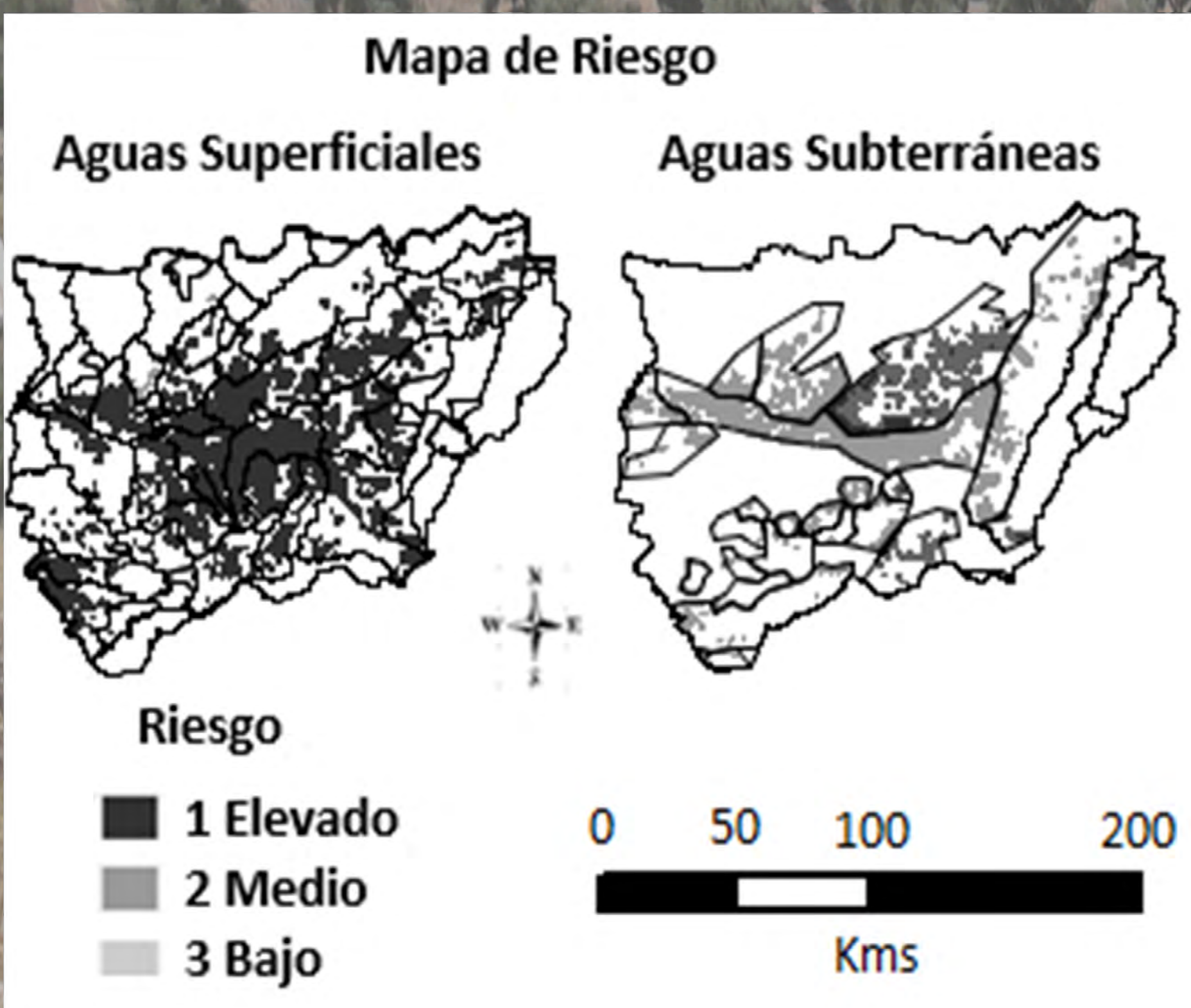
### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### ADICIÓN DE ÁCIDO NÍTRICO

La cantidad de ácido se puede determinar a través de distintos procedimientos, siendo el empleado una aproximación numérica a través del Índice de Langelier (Is).



#### MAPA DE RIESGO



En la precipitación de  $\text{CaCO}_3$  se observa que:

- Dureza del agua °fH es alta en ambos tipos de agua, con más del 99% de la superficie de olivar de regadío.
- Índice de Langelier, valores altos en más del 99% de la zona regada en aguas superficiales, y 41% en subterráneas.
- Índices RSC y ratio Ca/Mg, no existen valores significativos de riesgo tanto en superficiales como en subterráneas.

El mapa de riesgo de obturación de goteros (creado en base a los anteriores), revela que potencialmente hay más riesgo con el uso de agua superficial (con un 99,2 % del área de la superficie regada en la provincia afectada por el riesgo más alto) que con las aguas subterráneas (31,7 % de la superficie de olivar regado).

De los resultados de la cantidad de ácido nítrico a añadir, se desprende que es necesario su utilización en más del 82% en aguas superficiales y en más del 64% de las aguas subterráneas del área ocupada por olivar de regadío.

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El trabajo realizado, obtiene mapas de riesgos específicos de obturación de goteros, permitiendo una valoración, reflejada en superficie de olivar de riego afectada, de los efectos perniciosos que puede ocasionar regar con determinadas calidades de agua acotando y graduando las mismas según la potencialidad de obturaciones en los sistemas localizados de gotero, problema que actualmente se está manifestando en los riegos de olivar en la provincia de Jaén. La cantidad de ácido a inyectar en un agua de riego va a depender principalmente de las características del ácido que empleamos, así como de las características químicas de nuestra agua de riego. El modelo podría ser fácilmente traducido a otras regiones, cultivos y/o tipos de ácidos.



# COMPARACIÓN DE LAS MEDIDAS DE HUMEDAD EN SUELO ENARENADO CON DIFERENTES SENSORES

Baeza Cano, R., Contreras París, J.I., Alonso López, F., Cánovas Fernández, G., López Segura, J.G.

Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera (IFAPA), Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural de la Junta de Andalucía. Camino San Nicolás nº1. 04745 La Mojonera, Almería (España).

## INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Una opción ambiciosa para gestionar el riego es emplear sensores como activadores del riego. El éxito de la **automatización del riego** empleando **sensores de humedad de suelo** depende, entre otros factores, de la adaptación del sensor a las características del suelo.

**El objetivo de este trabajo es evaluar el comportamiento de tres equipos de medida de humedad en un suelo enarenado característico de los cultivos hortícolas bajo abrigo desarrollados en el Sureste de España.**

## MATERIAL Y MÉTODOS

### Localización:

Centro IFAPA La Mojonera.

**Suelo:** enarenado artificial.

**Tratamientos riego:** niveles elevados de humedad de suelo (tensiones <10 kPa) y niveles bajos (tensiones > 25 kPa).

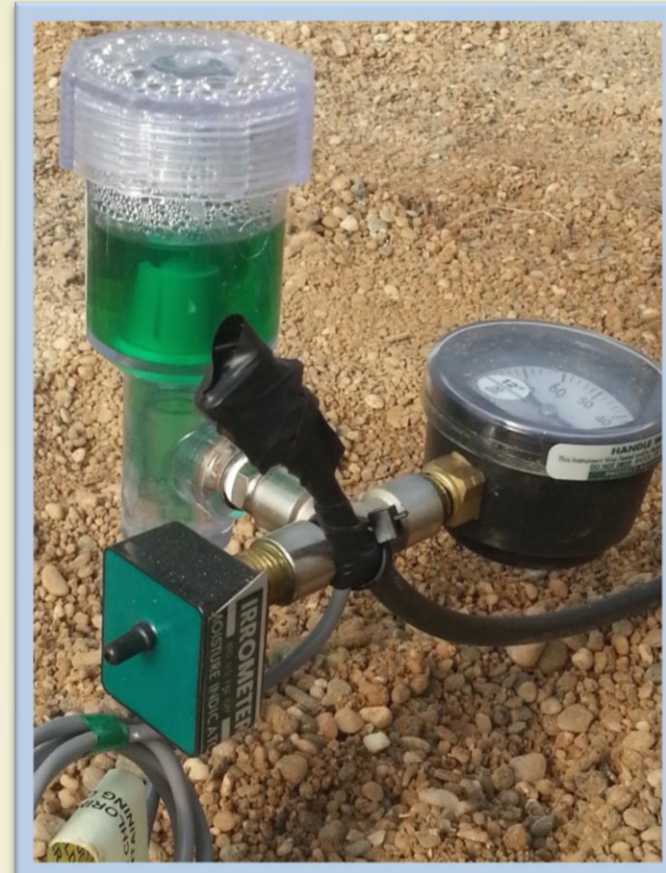
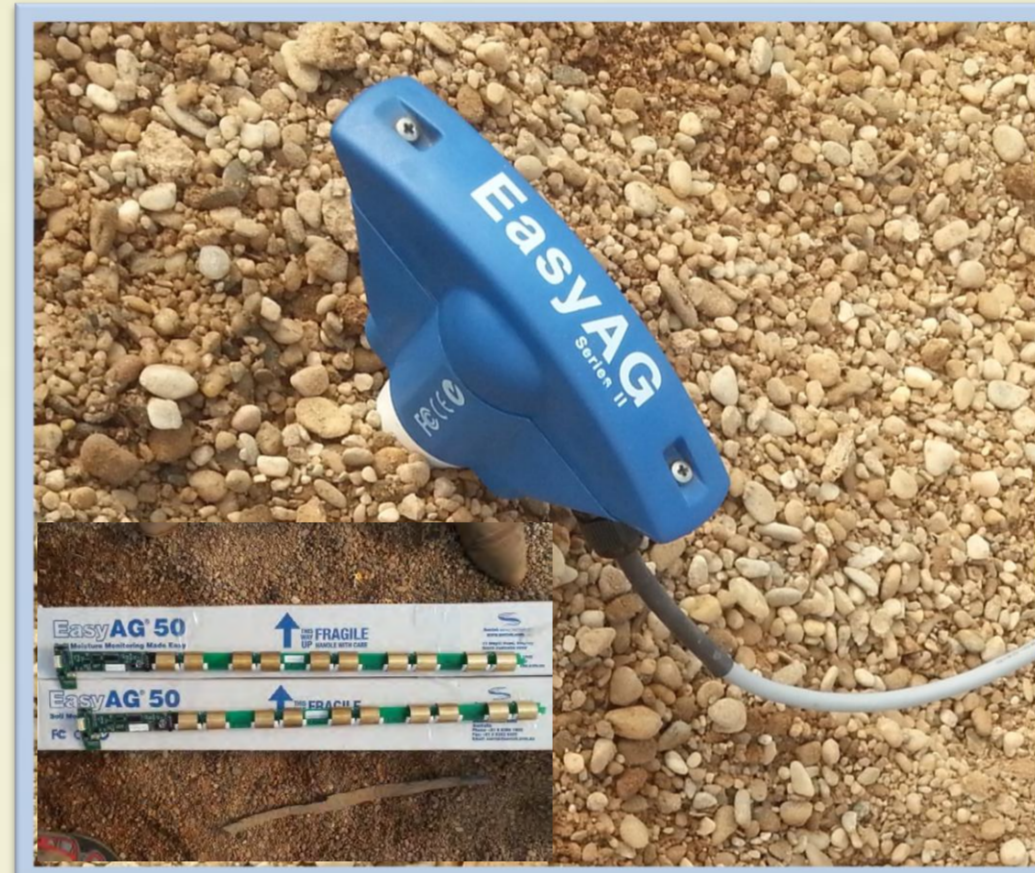


Figura 1. Sensores evaluados. Tensiómetros y sondas EasyAG®.



Sensores evaluados:

**Tensiómetros** (Irrometer Co, inc. Riverside, California). Disponen de un vacuómetro y están acoplados a un transductor electrónico (transfiere datos a equipo de control Sistema Red Himarcan®).

**Sondas EasyAG®** (Sentek Pty. Ltd, Australia). Cuentan con 5 anillos FDR distanciados 10 cm entre sí.

## RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Todos los tensiómetros, independientemente del rango de valores de potencial matricial en el que se encuentran, muestran curvas de evolución con similar tendencia (Figura 2). Sin embargo, las lecturas diarias de los tensiómetros difieren según sean electrónicas (transductor) o analógicas (vacuómetro), mostrando las primeras un ligero descenso en las horas centrales del día asociado a condiciones climáticas (Figuras 3 y 5). A pesar de esto, durante el resto del día las medidas son análogas (Figura 4).

Las sondas EasyAG® han mostrado menor sensibilidad que los tensiómetros para el rango de niveles de humedad alcanzado en este ensayo (valores cercanos a condiciones de capacidad de campo) (Figura 6).

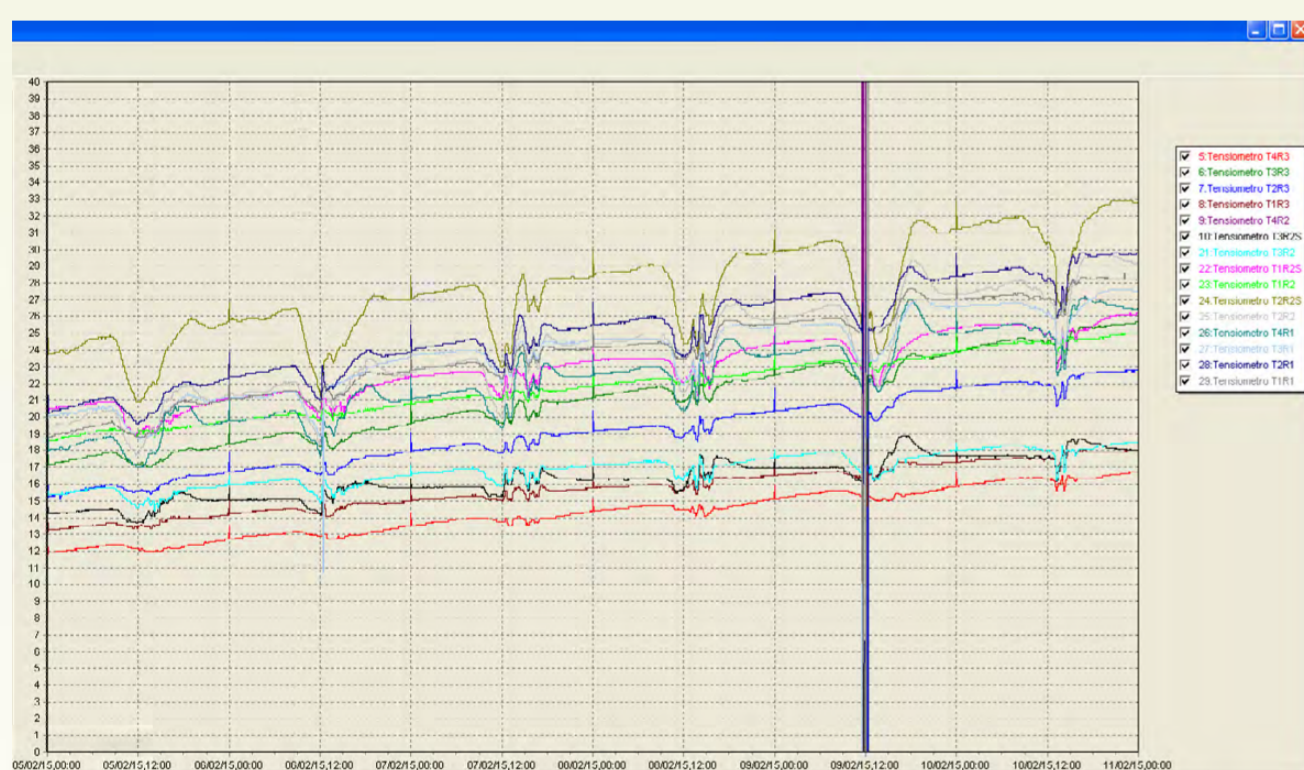


Figura 2. Evolución del potencial matricial para cada tensiómetro.

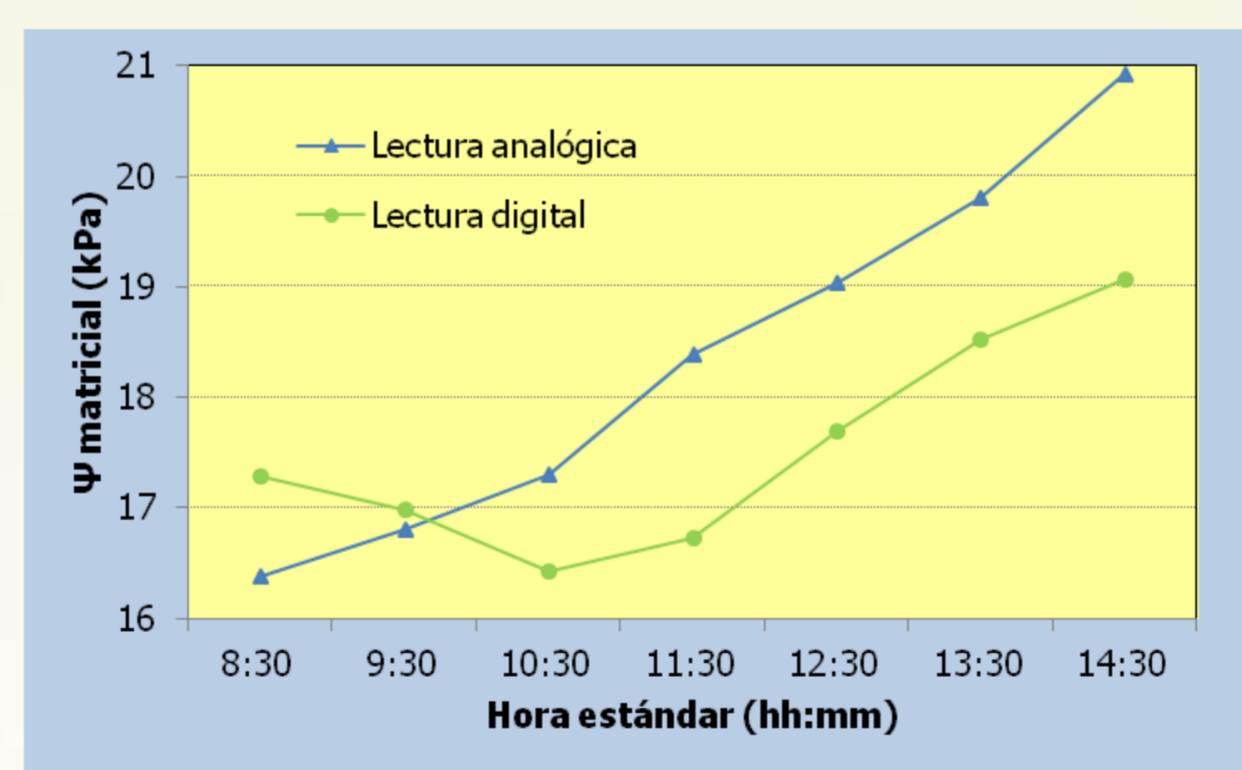


Figura 3. Evolución diaria del potencial matricial (lecturas analógicas y digitales).

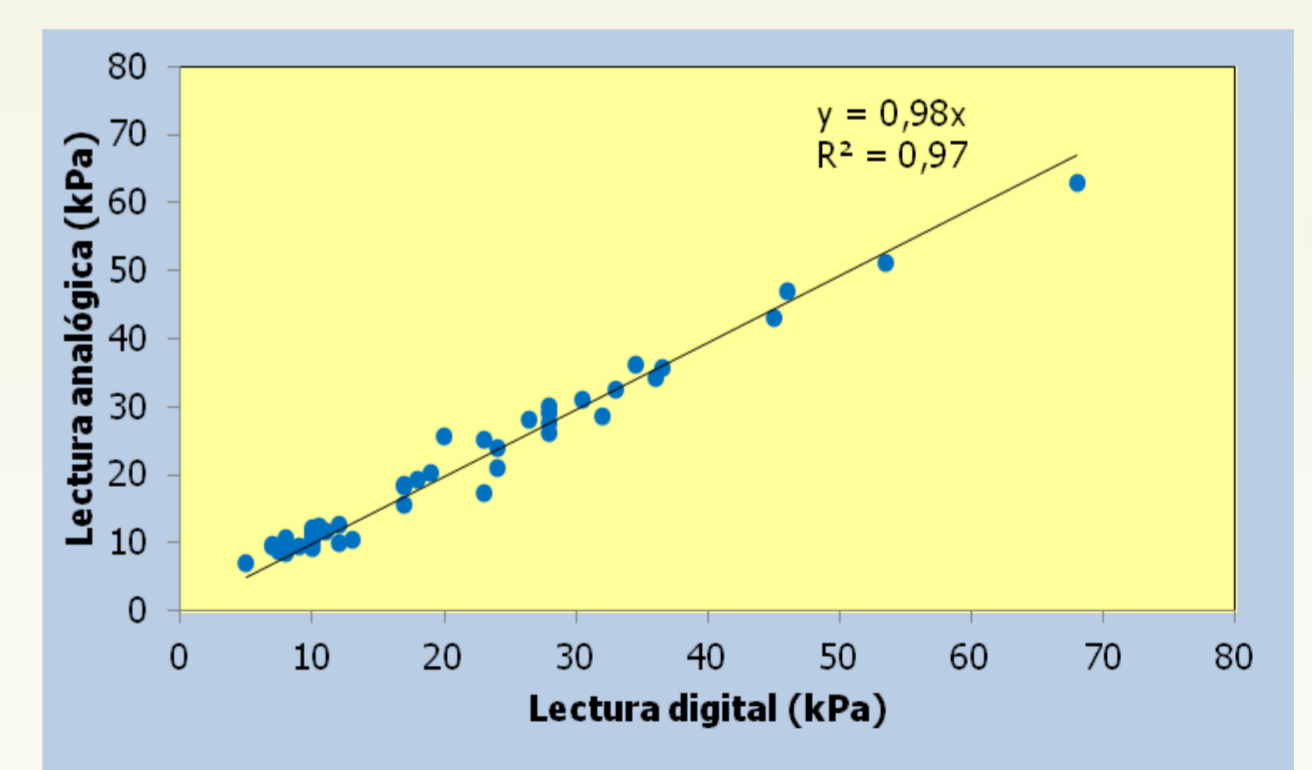


Figura 4. Recta de regresión entre los valores analógicos y digitales (a las 9:00 h).

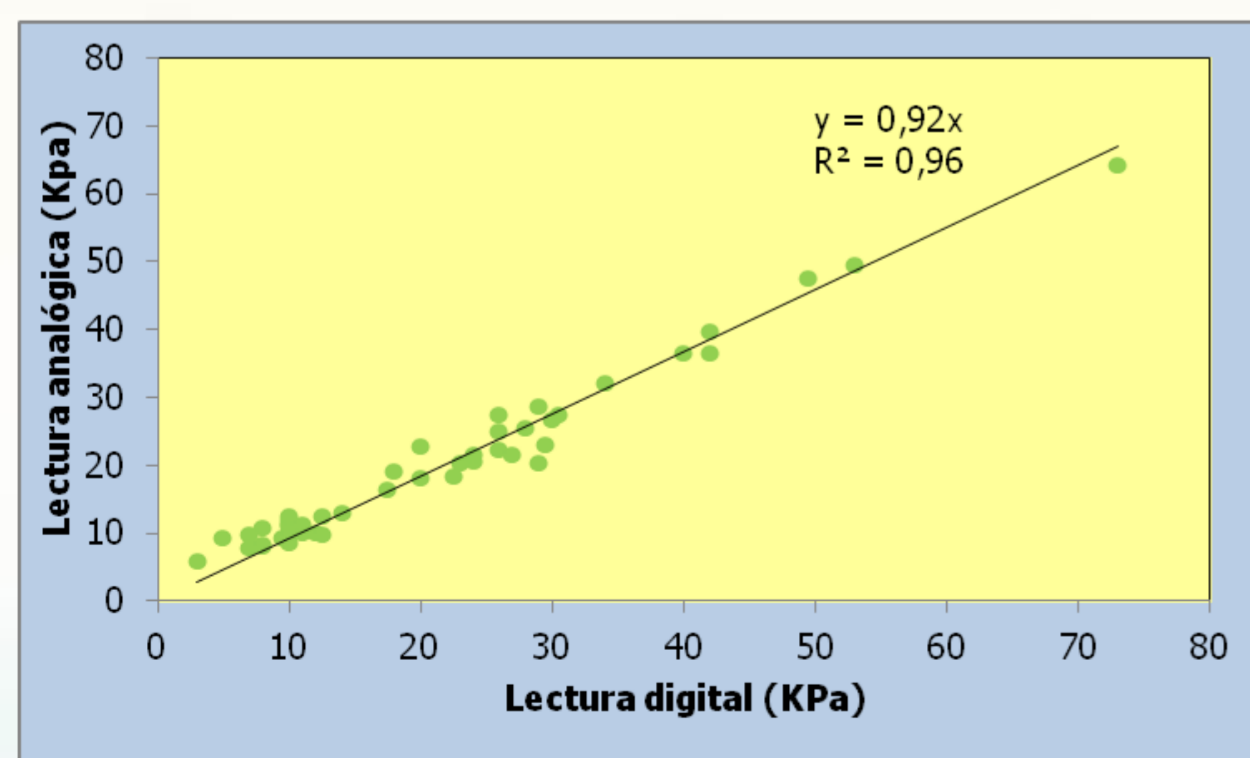


Figura 4. Recta de regresión entre los valores analógicos y digitales (a las 14:30).

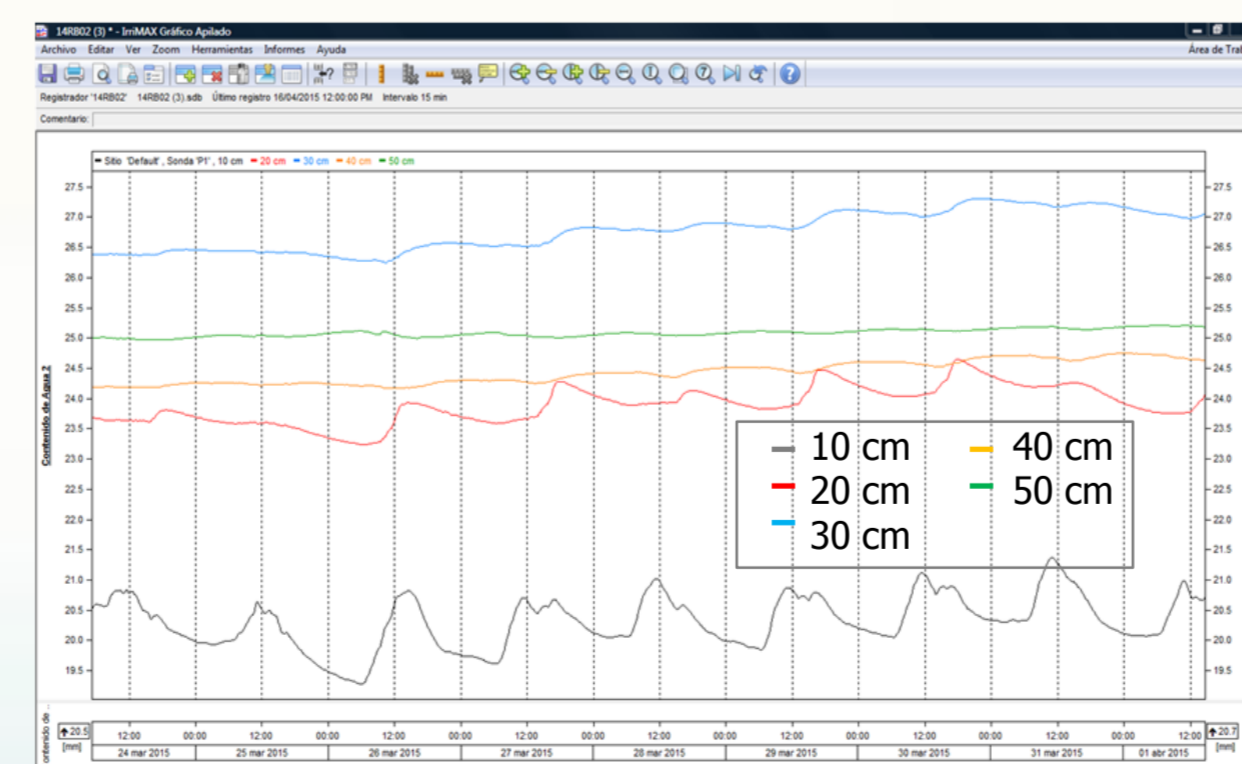


Figura 6. Evolución de la humedad volumétrica registrada por las sondas EasyAG®.

### AGRADECIMIENTO

El trabajo ha sido cofinanciado por Fondos Europeos (FSE y FEDER) y la Consejería de Agricultura y Pesca (IFAPA Junta de Andalucía) mediante el Proyecto Transforma Conecta SAR (PP.TRA.TRA201300.10).



Gromaz, A.<sup>1</sup>(P), Torres, J.F.<sup>2</sup>, Pascual Seva, N.<sup>3</sup>, San Bautista, A.<sup>3</sup>, López Galarza<sup>3</sup>, S., Pascual, B.<sup>3</sup>, Alagarda, J.<sup>3</sup>, Maroto, J.V.<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> Becario de Especialización. CVER. Universitat Politècnica de València. Camino de Vera s/n, 46022 Valencia [angrroi@etsia.upv.es](mailto:angrroi@etsia.upv.es)

<sup>2</sup> Investigador, CVER. Universitat Politècnica de València. jotorru@upvnet.upv.es

<sup>3</sup> Departamento de Producción Vegetal, Universitat Politècnica de València. Camino de Vera s/n, 46022 Valencia [asanbau@prv.upv.es](mailto:asanbau@prv.upv.es)

## 1. Introducción

Siguiendo la línea de trabajo dirigida a complementar y diversificar la Horticultura Valenciana, se ha llevado a cabo el estudio agronómico de la adaptación de *Physalis peruviana* L. a condiciones de cultivo bajo invernadero en la zona mediterránea.

En la actualidad uno de los factores más restrictivos en la producción hortícola es la disponibilidad de agua de riego, por ese motivo, resulta de gran importancia conocer cuáles son las necesidades del cultivo, y cómo afecta a la producción y calidad de los frutos, la utilización de diferentes dosis de riego.

En lo que respecta a la fertilización, el nitrógeno es un elemento fundamental para asegurar un adecuado desarrollo de cualquier cultivo hortícola, si bien un abonado excesivo puede producir un desarrollo vegetativo exuberante que actúe en detrimento de la producción, e inducir una mayor susceptibilidad a distintas fisiopatías.

El "cracking" o rajado de los frutos es una fisiopatía que se manifiesta en forma de grietas longitudinales en la superficie de los frutos. En el cultivo de *Physalis*, es uno de los factores que más condicionan la producción en todas las zonas de cultivo, llegándose a porcentajes de frutos afectados de entre el 30 y el 50 %.

El objetivo del presente experimento es evaluar la respuesta de las plantas de *Physalis* a la aplicación de diferentes dosis de riego y soluciones nutritivas, tanto en términos productivos (cantidad producida y calidad de la cosecha) como de desarrollo vegetativo.



## 2. Materiales y métodos

Se eligió un diseño del experimento en bloques al azar con 2 dosis de riego (D1 y D2) y 3 soluciones nutritivas (S1, S2 y S3) (Tabla 1) y 3 U.R. (unidades de repetición) de 5 plantas cada una; para un total de 18 U.R. y 90 plantas.

Las dosis de riego empleadas fueron:

D1 (dosis baja): 50% ET<sub>c</sub>

D2 (dosis media): 100% ET<sub>c</sub>

Tabla 1. Composición soluciones nutritivas (mmol·L<sup>-1</sup>)

Solución nutritiva	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	CE (dS·m <sup>-1</sup> )
S1	7.91	1.20	2.45	0.50	4.00	3.70	1.46	1.56
S2	12.41	1.20	2.45	0.50	5.00	3.95	2.96	2.01
S3	16.91	1.20	2.45	0.50	6.00	4.20	4.46	2.46

Los frutos se clasificaron en comerciales (sin "cracking"), cc ("cracking" concéntrico), cl ("cracking" longitudinal) y cc+cl (presentan simultáneamente ambos tipos)

Los análisis cualitativos consistieron en medidas de firmeza (penetrómetro) con aguja de 3 mm, °Brix (refractómetro) y acidez (AT) (valoración con NaOH 0.1N).

## 3. Resultados y Conclusiones.

Con la dosis de riego D1, la producción total aumentó al incrementarse el contenido de nitratos de las soluciones nutritivas, ajustándose a una recta (p<0.05).

Por su parte, las producciones asociadas a la dosis D2, se ajustaron a una polinómica de orden 2 (p<0.01), obteniéndose la mayor cosecha con la solución S2 (Fig. 1).

Las soluciones nutritivas y dosis de riego empleadas no ejercieron una influencia e.s. en la aparición de rajado en los frutos. De entre los frutos afectados por "cracking", los más abundantes fueron los que presentaron simultáneamente "cracking" concéntrico y longitudinal (Tabla 2).

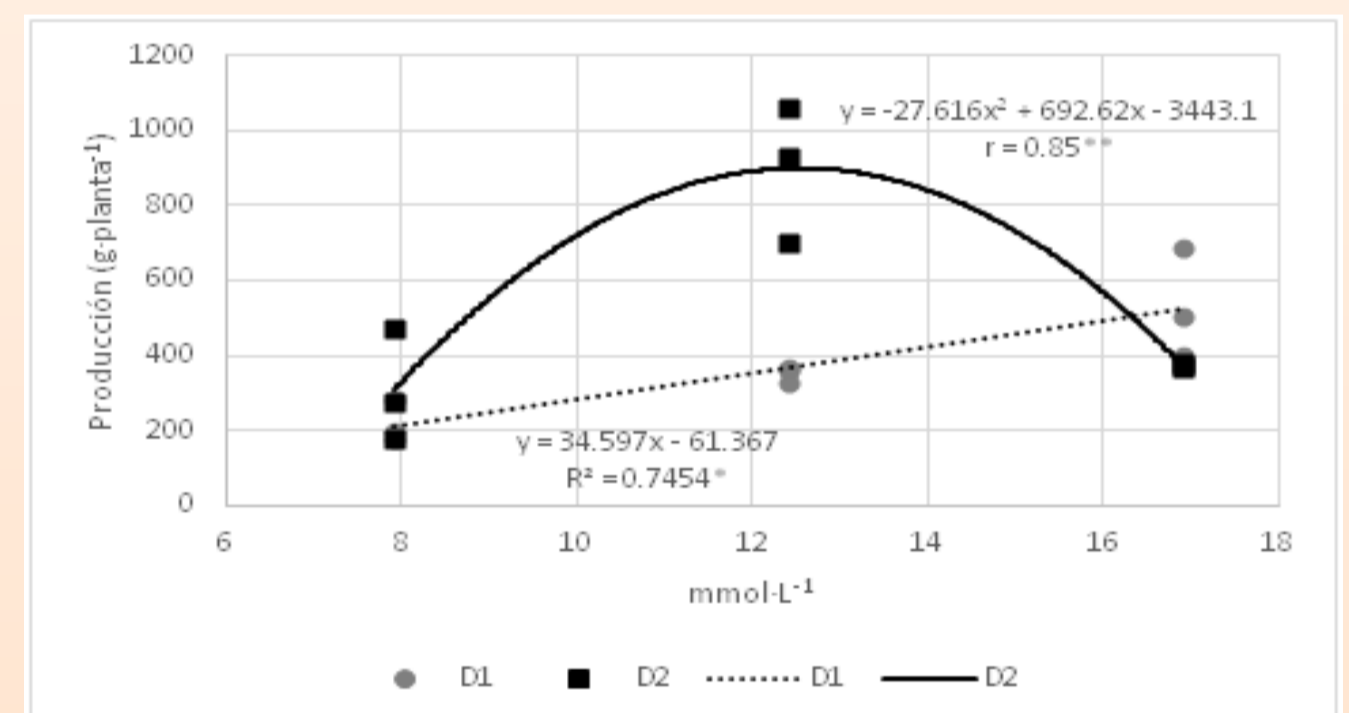


Figura 1. Producción total (g·planta<sup>-1</sup>) para las dosis D1 y D2 frente a la concentración de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> aportada.

Tabla 2. Parámetros productivos.

Solución	Número total (frutos·planta <sup>-1</sup> )	Producción total (g·planta <sup>-1</sup> )	Frutos com. (%)	Porcentajes "cracking" (%)		
				cc	cl	cc + cl
S1	148.9 b	263.5 c	59.67 -	4.43 -	12.83 -	22.40 -
S2	344.9 a	626.5 a	59.83 -	5.25 -	11.17 -	23.48 -
S3	267.7 a	451.5 b	60.45 -	2.85 -	16.42 -	20.05 -
<b>Dosis riego</b>						
D1	211.3 b	368.0 b	58.63 -	4.34 -	13.91 -	22.70 -
D2	296.4 a	526.4 a	61.33 -	4.01 -	13.03 -	21.26 -
<b>Resumen ANOVA</b>				<b>Significación de F</b>		
Solución (S)	**	**	ns	ns	ns	ns
Dosis (D)	*	*	ns	ns	ns	ns
S x D	**	**	ns	ns	ns	ns

Las soluciones nutritivas y las dosis de riego no tuvieron una influencia e.s. en las características cualitativas de los frutos (Tabla 3).

Las soluciones S2 y S3 y la dosis D2 dieron las plantas con un mayor peso seco de la parte aérea y una mayor altura (Tabla 4) (p<0.05).

Las mayores eficiencias de riego se consiguieron con las soluciones S2 y S3 y con la dosis de riego más baja (D1)(Tabla 4) (p<0.05).

Tabla 3. Parámetros cualitativos de los frutos

Solución	Firmeza (g)	°Brix	Acidez	Índice madurez (°Brix/Acidez)
S2	280.4 -	16.26 -	1.88 -	8.68 -
S3	271.4 -	16.16 -	1.75 -	9.15 -
<b>Dosis riego</b>				
D1	281.4 -	16.64 -	1.87 -	8.91 -
D2	272.0 -	16.28 -	1.80 -	9.07 -
<b>Resumen ANOVA</b>				
Solución	ns	ns	ns	ns
Dosis	ns	ns	ns	ns
Sol. x Dos.	ns	ns	ns	ns

Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas (p<0.05); ns : no significativa, \* y \*\* nivel de significación (p<0.05) y (p<0.01) respectivamente

Tabla 4. Parámetros de crecimiento vegetativo y riego.

Solución	Altura (cm)	Diámetro tallo (mm)	PS parte aérea (g·planta <sup>-1</sup> )	Eficiencia de riego (Kg·m <sup>-3</sup> )
S2	202.9 a	11.94 -	798.6 ab	1.961 a
S3	192.9 a	12.17 -	1063.9 a	1.799 a
<b>Dosis riego</b>				
D1	169.0 b	11.59 -	612.7 b	1.829 a
D2	206.5 a	11.80 -	970.6 a	1.285 b
<b>Resumen ANOVA</b>				
Solución	*	ns	**	**
Dosis	**	ns	**	*
Sol. x Dos.	ns	ns	Ns	**



# SOFTWARE PARA LA PROGRAMACIÓN DE UN RIEGO DE PRECISIÓN EN EL CULTIVO DE LA FRESA

González Perea, R.<sup>1</sup>, Fernández García, I., Martín Arroyo, M., Rodríguez Díaz, J.A., Camacho Poyato, E., Montesinos Barrios, P.

XXXIII CONGRESO NACIONAL DE RIEGOS  
Valencia 16-18 Junio 2015

## INTRODUCCIÓN

Bajo un escenario de menor disponibilidad de agua, aumento de la frecuencia de las sequías y las incertidumbres asociadas al cambio climático, el sector del riego en Europa tiene que aumentar la productividad del agua mediante una mejora de la eficiencia en el uso de la misma. El sector fresero concentrado en un entorno de alta sensibilidad medioambiental (Parque Nacional de Doñana, Huelva) es un buen ejemplo de cultivo con alta dependencia de recursos hídricos. Más del 90% de la producción es destinada a mercados internacionales que demandan fresas de alta calidad, producidas en condiciones sostenibles. Por tanto, para asegurar la supervivencia del cultivo de fresa en la zona de Huelva resulta imprescindible desarrollar herramientas que permitan a los productores un uso óptimo de estos recursos hídricos.

## OBJETIVO

desarrollar un software que permita a los productores de fresa en la zona de Huelva realizar una programación de riego que maximice la eficiencia en el uso de los recursos hídricos, teniendo en cuenta la configuración hidráulica de cada sector de riego así como las condiciones climáticas en tiempo real de la zona y el estado fenológico del cultivo.

## METODOLOGÍA

### Programación del riego

#### Necesidades teóricas del cultivo (ET<sub>c</sub>)

$$ET_c = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m K_{cij} \cdot ET_{ofp} + \sum_{i=n+1}^k \sum_{j=m+1}^l K_{cij} \cdot ET_{obp}$$

i	Índice relativo al día de la campaña
j	Índice relativo a la fase de desarrollo del cultivo
K <sub>cij</sub>	Coefficiente de cultivo
ET <sub>ofp</sub>	Evapotranspiración de referencia estimada fuera del macrotúnel (mm día <sup>-1</sup> )
ET <sub>obp</sub>	Evapotranspiración de referencia estimada dentro del macrotúnel (mm día <sup>-1</sup> )

#### Rendimiento de aplicación (R<sub>a</sub>)

Relación entre el volumen de agua aplicada por los emisores de riego y el volumen de agua aprovechado por la planta. Depende de la configuración del sector y nos define las necesidades brutas de agua del cultivo:

Relación entre R<sub>a</sub> y superficie de un sector de riego con la configuración típica de la zona de estudio (obtenidos mediante el simulador hidráulico EPANET)

R <sub>a</sub>	Superficie del sector (S <sub>sector</sub> ) (ha)			
	S <sub>sector</sub> ≤ 0.25	0.25 < S <sub>sector</sub> ≤ 0.5	0.5 < S <sub>sector</sub> ≤ 0.75	S <sub>sector</sub> > 0.75
	0.9	0.85	0.8	0.75

#### Sistema de riego

Riego por goteo. Las cintas más usuales son:

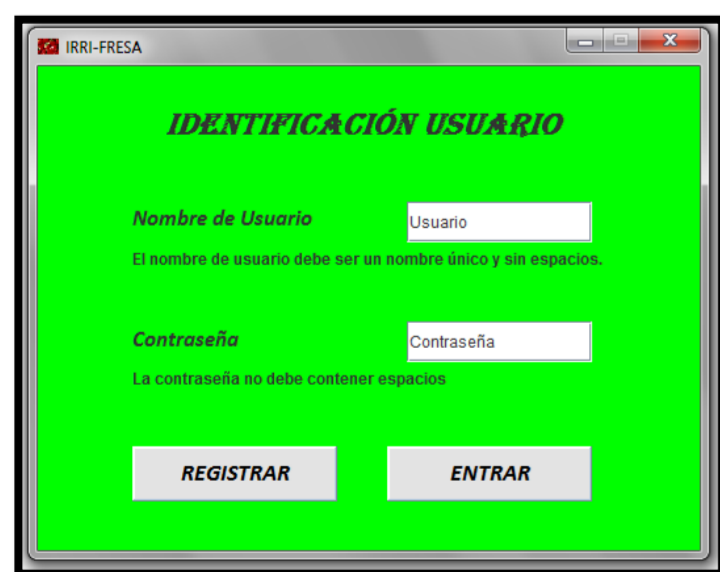
- T-Tape de 3.0 l h<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>
- T-Tape de 3.8 l h<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>
- T-Tape de 5.0 l h<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup>

### Software: Esquema de funcionamiento



## RESULTADOS

### Identificación del usuario



El software fue desarrollado en JAVA y consta de 12 ventanas para el módulo de PC y un Widget para la APP

PC module

### Caracterización de la finca y programación



### Salidas proporcionadas por el software



## Conclusiones

Irri-Fresa proporciona al sector del cultivo de la fresa una herramienta fácil y rápida para obtener una programación de riego óptima y actualizada por semanas y personalizada por cada usuario. Actualmente está siendo usada satisfactoriamente por diversos productores de la zona, obteniendo ahorros significativos de agua y ayudando a concienciar al sector fresero de la importancia de conocer y optimizar sus recursos hídricos.



## Plataforma para la gestión integral y eficiente del riego

Martínez Gimeno, M.A. (1), Martínez Alzamora, F. (2), Jiménez-Bello, M.A. (3)  
Royuela. A. (4), Manzano, J. (5), Intrigliolo, D.S.(6)

C-10

IIAMA - UPV <sup>2</sup>fmartine@hma.upv.es ; <sup>3</sup>mijibar@dihma.upv.es  
CVER - UPV <sup>4</sup>aroyuela@agf.upv.es; <sup>5</sup>juamanju@agf.upv.es  
CEBAS - CSIC <sup>1</sup>magimeno@cebas.csic.es; <sup>6</sup>dintri@cebas.csic.es



### 1. Objetivo

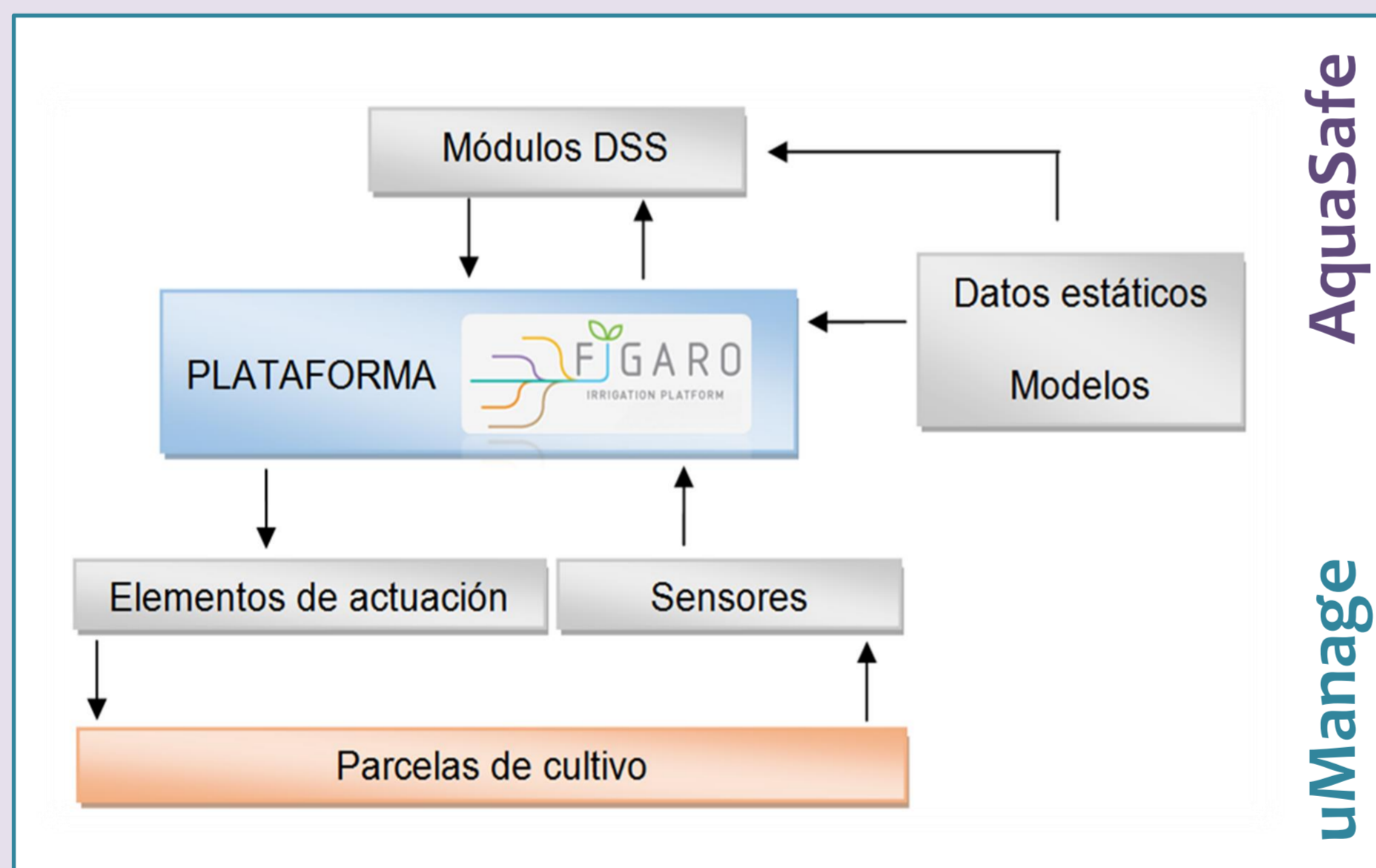
**RIEGO = AGUA + ENERGÍA**

Consecuencias económicas y ambientales.  
**¿SOLUCIONES? INTEGRALES Y EFICIENTES**

...

Se presenta la plataforma informática FIGARO (Flexible and Precise Irrigation Platform to Improve Farm Scale Water Productivity), en cuyo desarrollo participan 17 socios de 8 países (Israel, Reino Unido, Dinamarca, Holanda, Portugal, Italia, Grecia y España). El objetivo principal es crear una **herramienta informática** de soporte a la toma de decisiones, que permita a los agricultores realizar programaciones de riego dirigidas a **reducir el uso de agua, energía y fertilizantes**, a la vez que se maximiza la productividad de las cosechas.

### 2. Bases de la plataforma



La plataforma FIGARO basa su funcionamiento en el uso simultáneo de bases de datos (ambientales, cultivos, red de riego) y diversos modelos de optimización integrados en servidores propios. Concretamente, los datos estáticos, los datos dinámicos procedentes de los sensores y los elementos de actuación son almacenados y mostrados al usuario a través de una interfaz gráfica denominada **uManage**. Éste a su vez, alimenta a la plataforma **AquaSafe**, que integra los diferentes módulos de optimización que proporcionan recomendaciones fiables a los usuarios sobre **cuánto y cuándo deben regar**.

### 3. Validación de la plataforma

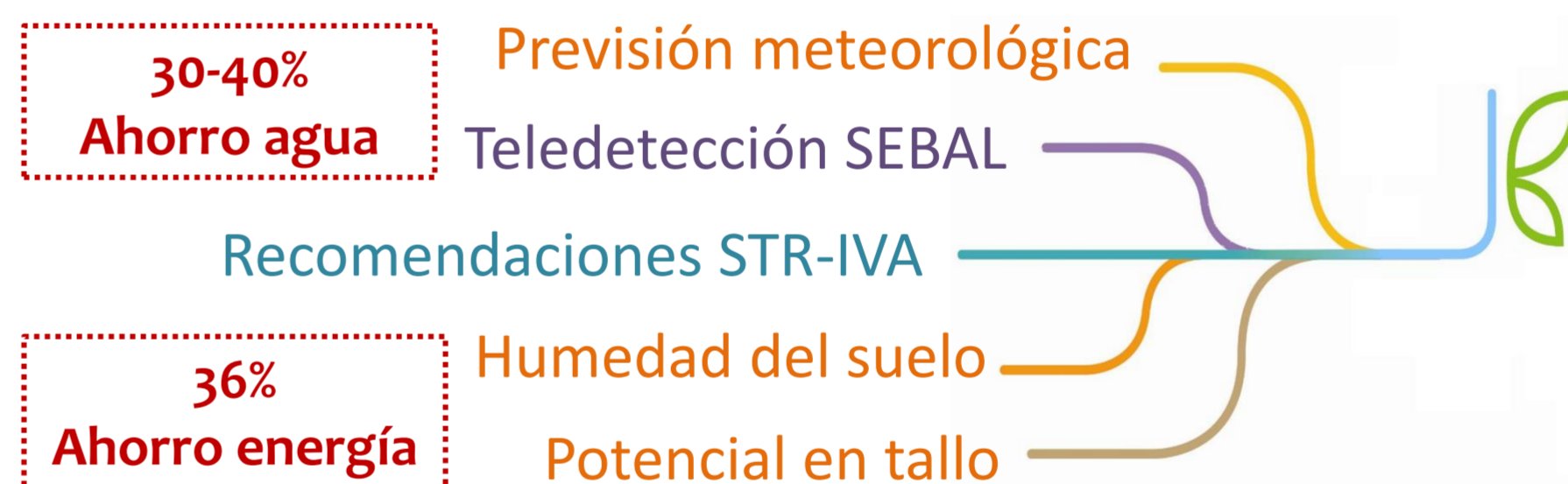
Cultivos herbáceos: Israel, Reino Unido, Dinamarca, Holanda, Portugal, Italia, Grecia.



Se dispone de parcelas de **cítricos** ubicadas en la Comunidad de Regantes de Picassent y una parcela experimental de **vid** localizada en Cheste (ambas en la Comunidad Valenciana).

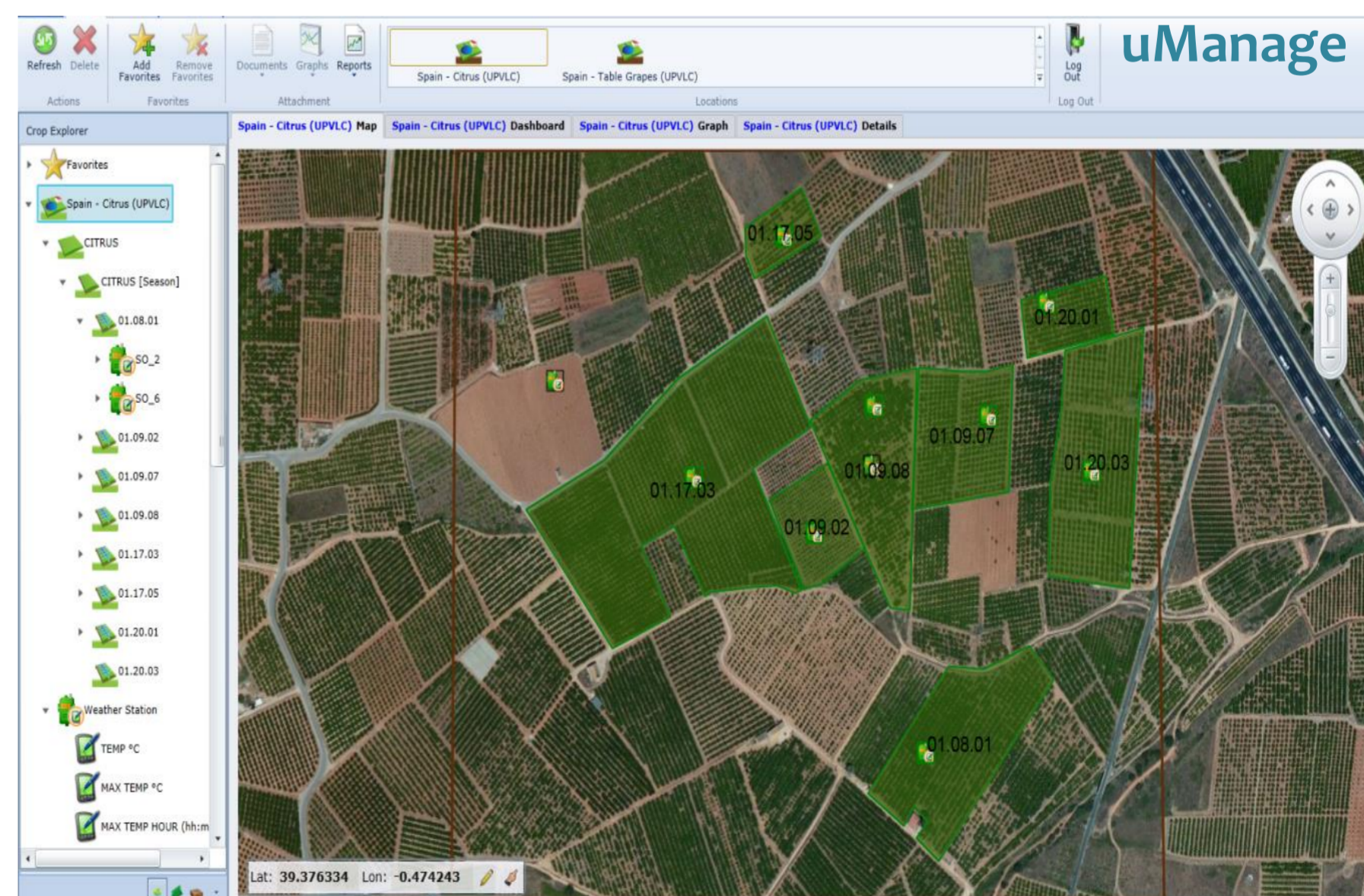
#### Optimización del riego:

Ajuste de recomendaciones en función de las condiciones del continuo suelo – atmósfera – planta.



#### Optimización energética:

Se ha desarrollado un módulo que establece el calendario de riego de las tomas, suministrando las necesidades estimadas de los cultivos y garantizando que el consumo energético sea mínimo satisfaciendo la garantía de suministro.





# RESULTADOS DE ENSAYOS DEL BANCO AUTOMÁTICO DE ASPERSORES

Salvatierra Bellido, B., Gómez Durán, E., Andrades Gonzalez, J.A., Viqueira Pino, S.  
 Instituto de Investigación y Formación Agraria de la Junta de Andalucía (IFAPA). benito.salvatierra@juntadeandalucia.es

IFAPA

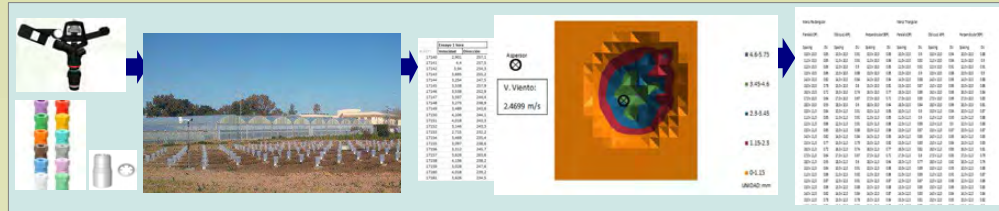
## EL BANCO AUTOMÁTICO DE ENSAYO DE ASPERSORES.

Resultado de las necesidades del sector, el IFAPA, desarrolló un banco de ensayos capaz de incorporar la influencia del viento al ensayo de uniformidad de los sistemas de aspersión.

1. Selección del aspersor y complementos a ensayar, boquillas y vainas prolongadoras.
2. Selección de la presión de ensayo. 2,5 kg/cm<sup>2</sup>, 3 kg/cm<sup>2</sup>, 3,5 kg/cm<sup>2</sup>.
3. Puesta en funcionamiento del banco automático de ensayo de aspersores.
4. Recogida de datos de lluvia y viento.
5. Procesado de datos y resultados. → Interpretación.

## RESULTADOS PERSEGUIDOS

- Ayudar a usuarios de sistemas de aspersión en la elección y diseño de sus instalaciones.
- Evaluar el funcionamiento de los distintos equipos en condiciones variables de viento y presión.
- Detectar e identificar el marco más eficiente según las condiciones de viento dominantes en la zona.
- Incorporar los ensayos a una base de datos para su futuro análisis.

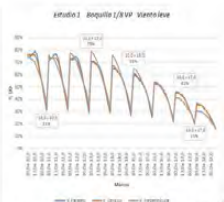


## ENSAYOS REALIZADOS

- **Estudio 1**, Influencia de la dirección del viento: Variación de la UD respecto a las distintas disposiciones de marco para un ataque del viento paralelo, oblicuo y perpendicular. Variables fijadas: presión 3.5 bar y marco rectangular.
- **Estudio 2**, Influencia de la disposición del marco en cobertura superficial: Variación de la UD respecto a las distintas disposiciones de marcos pequeños según sea el marco rectangular o triangular. Variables fijadas: presión 3.5 bar y viento perpendicular.
- **Estudio 3**, Influencia de la disposición del marco en cobertura enterrada: Variación de la UD respecto a las distintas disposiciones de marco grandes según sea el marco rectangular o triangular. Variables fijadas: presión 3.0 bar y viento perpendicular.
- **Estudio 4**, Influencia de la velocidad del viento: Comparativa de la UD para viento fuerte y leve. Variables fijadas: viento oblicuo, marco rectangular y boquilla 5/32 VP.

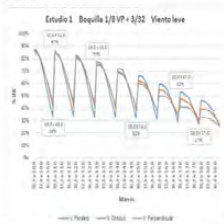
### Estudio 1, Influencia de la dirección del viento.

➤ Boquilla 1/8" VP



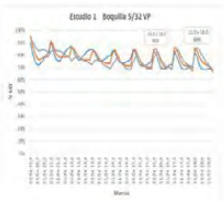
Gráfica 1: Gráfica lineal del porcentaje de uniformidad de distribución (UD) en diferentes tamaños de marco con tres tipos de dirección de ataque del viento: paralelo (a), oblicuo (b) y perpendicular (c) a las líneas de aspersión.

➤ Boquilla 1/8" VP + 3/32"



Gráfica 2: Gráfica lineal del porcentaje de uniformidad de distribución (UD) en diferentes tamaños de marco con tres tipos de dirección de ataque del viento: paralelo (a), oblicuo (b) y perpendicular (c) a las líneas de aspersión.

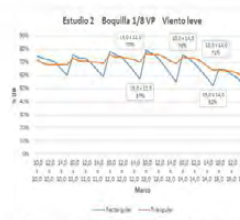
➤ Boquilla 5/32 VP



Gráfica 3: Gráfica lineal del porcentaje de uniformidad de distribución (UD) en diferentes tamaños de marco con tres tipos de dirección de ataque del viento: paralelo (a), oblicuo (b) y perpendicular (c) a las líneas de aspersión.

### Estudio 2, Influencia de la disposición del marco en cobertura superficial.

➤ Boquilla 1/8 VP



Gráfica 4: Gráfica lineal del porcentaje de uniformidad de distribución (UD) en diferentes tamaños de marco con dos tipos de dimensiones de marco: rectangular y triangular.

➤ Boquilla 5/32 VP



Gráfica 6: Gráfica lineal del porcentaje de uniformidad de distribución (UD) en diferentes tamaños de marco con dos tipos de dimensiones de marco: rectangular y triangular.

### Estudio 3, Influencia de la disposición del marco en cobertura enterrada.

➤ Boquilla 11/64



Gráfica 7: Gráfica lineal del porcentaje de uniformidad de distribución (UD) en diferentes tamaños de marco con dos tipos de dimensiones de marco: rectangular y triangular.

➤ Boquilla 3/16 VP



Gráfica 8: Gráfica lineal del porcentaje de uniformidad de distribución (UD) en diferentes tamaños de marco con dos tipos de dimensiones de marco: rectangular y triangular.

## CONCLUSIONES

De las situaciones ensayadas se ha observado:

- La uniformidad de distribución mejora usando aspersores con dos boquillas respecto al uso de una sola boquilla.
- La UD desciende más acusadamente al aumentar la velocidad del viento en marcos amplios respecto a separaciones menores.
- En aspersores con dos boquillas, los marcos cuadrados presentan mayor UD que los marcos rectangulares.
- Los marcos triangulares tienen mayor UD respecto a los marcos rectangulares.
- Dichas conclusiones coinciden y complementan lo expuesto por Tarjuelo Martín Benito (1992)

### Estudio 4, Influencia de la velocidad del viento.



Gráfica 9: Gráfica lineal del porcentaje de uniformidad de distribución (UD) en diferentes tamaños de marco con dos tipos de velocidad de viento y presión de trabajo.

❖ Los ensayos realizados hasta el momento son escasos para contemplar todas situaciones reales en una bases de datos. Es necesario seguir ensayando más situaciones para generar un sistema experto de cálculo de UD de aspersores.

# PATROCINADORES

